



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Determinación experimental de la recuperación elástica de piezas dobladas en función del sentido de laminación en Aceros ASTM A36, ASTM A-569 y Aluminio 3003 H-14.

Autores:

Javier A. Márquez D.

Pedro J. Padrón S.

Naguanagua, Octubre de 2010



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Determinación experimental de la recuperación elástica de piezas dobladas en función del sentido de laminación en Aceros ASTM A36, ASTM A-569 y Aluminio 3003 H-14.

Trabajo especial de grado presentado ante la Ilustre Universidad de Carabobo para optar al título de Ingeniero Mecánico

Tutor académico:

Prof. Oswaldo Urbano

Tutor externo:

Ing. Cesar Márquez

Autores:

Javier A. Márquez D.

Pedro J. Padrón S.

Naguanagua, Octubre de 2010



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Determinación experimental de la recuperación elástica de piezas dobladas en función del sentido de laminación en Aceros ASTM A36, ASTM A-569 y Aluminio 3003 H-14.

Trabajo especial de grado presentado ante la Ilustre Universidad de Carabobo para optar al título de Ingeniero Mecánico

Javier A. Márquez D.

Pedro J. Padrón S.

Naguanagua, Octubre de 2010



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Quienes suscriben, Miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para examinar la Tesis de Pregrado titulada ***“Determinación experimental de la recuperación elástica de piezas dobladas en función del sentido de laminación en Aceros ASTM A36, ASTM A-569 y Aluminio 3003 H-14.”***, presentada por los bachilleres: **Pedro J. Padrón S., Javier A. Márquez**, portadores de la Cédula de Identidad N°: **18.470.114, 16.051.209**, respectivamente; hacemos constar que hemos revisado y aprobado el mencionado trabajo.

Prof. Tutor, *Ing. Oswaldo Urbano*
Presidente del jurado

Prof. Jurado1, *Ing. Carmelo Torres*
Miembro del jurado

Prof. Jurado2, *Ing. Argel Porrello*
Miembro del jurado

En Naguanagua a los 18 días del mes de Octubre de 2010

Agradecimientos

A ENCAVA C.A., empresa que nos facilitó los materiales para la ejecución de los ensayos requeridos por la investigación.

A Cesar Márquez como tutor externo quien nos brindó asesoría técnica e información necesaria referida a los procesos relacionados con la investigación.

A el Profesor Oswaldo Urbano, tutor de esta investigación por sus consejos y sus constantes sugerencias durante el desarrollo de esta investigación. De igual manera agradecemos a los profesores e integrantes del departamento así como el laboratorio de materiales y procesos de fabricación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo quienes, durante el desarrollo de la investigación prestaron toda su colaboración para la ejecución de la investigación.

Dedicatoria

A Dios todopoderoso que permite día a día disfrutar con salud el compartir de mi familia, que me brindó la oportunidad de encarar con éxito todas las metas planteadas durante mis estudios, me abrigó con su sabiduría y permitió con éxito completar mi formación universitaria.

A mis Padres María Irene Sequera y Pedro Padrón quienes día a día con sacrificios y esfuerzos me brindaron el apoyo constante e hicieron posible tan importante logro. Gracias.

A mis hermanos Daniel y Alejandro, quienes siempre estuvieron presentes dando apoyo y compartiendo momentos agradables. Gracias.

A mis amigos y compañeros que estuvieron siempre en tan difícil tarea pero no imposible y en el día de hoy compartimos tan grato éxito.

A todas aquellas personas que hicieron de alguna manera u otra posible la realización de esta investigación.

Pedro J. Padrón S.

Dedicatoria

A Dios mi señor, guía y compañero en cada uno de los pasos que hicieron que esta gran meta fuese posible.

A mis padres Clementina Delgado y Julio Márquez, que me dieron la vida y han estado conmigo en todo momento, por brindarme todo su amor y apoyo incondicional en cada una de mis decisiones, por enseñarme que no existe ninguna meta que no sea posible, solo necesitamos creer en nosotros mismos. Gracias por estar siempre conmigo.

A mis hermanos Cesar Márquez y Eduardo Márquez, quienes siempre me han brindado todo su apoyo, compartiendo momentos agradables y felices, por su gran apoyo en las buenas y las malas. Gracias

A todas aquellas personas que hicieron de alguna manera u otra posible la realización de esta investigación.

Javier A. Márquez D.

Resumen

El objetivo de la presente investigación fue determinar el efecto de las orientaciones de laminación sobre la recuperación elástica de piezas obtenidas según doblado en “V” para Aceros ASTM A36, ASTM A-569 y Aluminio 3003 H-14 a distintos espesores. En el desarrollo de la investigación se llevaron a cabo un conjunto de ensayos que permitieron obtener las propiedades mecánicas de los materiales en estudio y a su vez se realizaron ensayos de doblado bajo condiciones controladas que permitieron medir los valores de recuperación elástica. El análisis fue realizado a través de gráficas y ecuaciones, estableciendo valores teóricos y experimentales. En los resultados obtenidos se pudo establecer que la recuperación elástica se ve influenciada por el material, espesor y sentido de laminación. Quedo demostrado que a mayor espesor de lámina mayor será la recuperación elástica. En función al sentido de laminación se tiene una mayor recuperación en el sentido paralelo debido a las disposiciones de los granos durante la deformación. Además se comprobó que el factor geométrico $k = 1,33$ que depende de la dimensión de la matriz (abertura de la matriz), no se adapta a todos los ensayos de doblado en “V” debido a que cada prueba posee condiciones distintas, que modifica los resultados de cada ensayo. Una condición primordial para la correcta ejecución del proceso de doblado es la óptima selección de la abertura de la matriz.

Símbolos y Abreviaturas

Variable	Descripción	Unidad
A_f	Área de reducción transversal de la probeta de tracción	(mm ²)
A_o	Área transversal inicial de la probeta	(mm ²)
A_r	Coficiente entre el área de reducción en el ensayo de tracción y el área transversal inicial de la probeta	----
β	Angulo de doblado	(°)
R	Radio de doblado	(mm)
l	Longitud de doblez	(mm)
F_{max}	Fuerza máxima de doblado	(N)
K	Factor geométrico	----
S_{max}	Esfuerzo máximo a la tracción	(MPa)
t	Espesor de la lámina	(mm)
W	Abertura de la matriz	(mm)
β_i	Angulo inicial de doblado	(°)
β_f	Angulo final de doblado	(°)
Δβ	Valor de recuperación	(°)
E	Modulo de elasticidad del material	(MPa)
K_r	Factor de recuperación	----
R_i	Radio inicial de doblado	(mm)
R_f	Radio final de doblado	(mm)
S_y	Esfuerzo de fluencia	(MPa)
ε_o	Deformación real	----
ε_f	Deformación real a la fractura	----
R_{min}	Radio mínimo de doblado	(mm)
Θ	Angulo interno de doblado	(°)

Índice general

Índice general	i
Índice de figuras	v
Índice de tablas	vii
CAPÍTULO 1 Introducción	1
1.1 Introducción, 1	
1.2 Situación problemática, 2	
1.3 Objetivos, 4	
1.3.1 <i>Objetivo General</i> , 4	
1.3.2 <i>Objetivos Específicos</i> , 4	
1.4 Justificación, 5	
1.5 Alcance, 5	
1.6 Limitaciones, 6	
CAPÍTULO 2 Bases teóricas	7
2.1 Antecedentes de la Investigación, 7	
2.2 Bases teóricas, 10	
2.2.1. Operaciones de doblado, 10	
2.2.2. Tipos de doblado, 11	
2.2.3. Recuperación o “Springback”, 20	
2.2.4. Definiciones iniciales de recuperación, 21	
2.2.5. Variables de influencia sobre la recuperación, 25	
CAPÍTULO 3 Marco metodológico	27
3.1 Nivel de la investigación, 27	
3.2 Diseño de la investigación, 28	
3.2.1. <i>Etapas 1. Preparación de las probetas para los ensayos</i>	

<i>de tracción y doblado en "V", 28</i>		
3.2.2. <i>Etapa 2. Realización de ensayos de tracción, 29</i>		
3.2.3. <i>Etapa 3. Realización de ensayos de doblado en "V", 29</i>		
3.2.4. <i>Etapa 4. Evaluación y comparación de la recuperación elástica y la carga de doblado, 30</i>		
3.3. Ensayos contemplados, 30		
3.3.1. <i>Microscopia Óptica, 30</i>		
3.3.2. <i>Ensayos de dureza, 31</i>		
3.3.3. <i>Ensayo de tracción, 32</i>		
3.3.4. <i>Ensayo de doblado, 34</i>		
3.4. Población y Muestra, 35		
3.5. Técnica de recolección de datos, 36		
3.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos, 36		
3.7. Materiales y equipos, 36		
CAPÍTULO 4	Resultados y Análisis de Resultados	41
4.1. Introducción, 41		
4.2. Composición química, 41		
4.3. Microscopia realizada a probetas, 42		
4.4. Ensayos de tracción, 42		
4.5. Ensayos de doblado, 53		
4.6. Resultados de la carga experimental en el doblado en "V", 57		
4.7. Ensayo de Microdureza Vickers, 58		
4.8. Cálculo del factor de forma para matriz en "V", 60		
4.9. Angulo final de doblado en "V", 63		
4.10. Cálculo del factor de recuperación "Kr" y el ángulo de recuperación elástica " $\Delta\beta$ ", 65		
4.11. Cálculo del factor de recuperación elástica "Kr" teórico, 68		
4.12. Resultados del radio final y ángulo final de la probeta después del doblado en "V", 70		
4.13. Análisis de los resultados, 71		
4.13.1. <i>Ensayos de tracción, 71</i>		
4.13.2. <i>Factor de forma para doblado en "V", 72</i>		
4.13.3. <i>Recuperación elástica para el doblado en "V", 73</i>		
4.13.4. <i>Ensayos de dureza Vickers, 73</i>		
4.13.5. <i>Carga de doblado en "V", 74</i>		
4.13.6. <i>Radio final de curvatura de la pieza doblada, 75</i>		
CAPÍTULO 5	Conclusiones y Recomendaciones	77
ANEXOS		81
Referencias bibliográficas		85

Índice de figuras

2.1. Localización de las regiones sometidas a tracción o a compresión durante la operación de doblado de un componente metálico	11
2.2. Representación del doblado en “V”.	14
2.3. Representación de matriz y punzón correspondiente a un doblado en “U” y proceso de doblado en “U”	15
2.4. Terminología del doblado	16
2.5. Efecto de las inclusiones alargadas (longitudinales) sobre el agrietamiento, en función de la dirección del doblado con respecto a la dirección del laminado original de la hoja	16
2.6. La recuperación elástica en el doblado	18
2.7. Métodos para reducir o eliminar la restitución en las operaciones de doblado	19
2.8. Operaciones comunes en doblado con matriz, indicando la dimensión de la abertura del dado W	19
2.9. Definición de estados para estudio de la recuperación	21
2.10. Variación del ángulo $\Delta\theta$ durante la recuperación de la lámina en doblado en “V”	23
3.1. Cortes para la elaboración de muestras según la dirección de laminación	28
3.2. Probetas utilizadas en el ensayo de tracción	28
3.3. Aplicación del ensayo de tracción a probetas	29
3.4. Herramientales usados en el ensayo de doblado “V”	29
3.5. Microscopio Óptico unión, modelo MC- 86267 perteneciente al laboratorio de materiales de la facultad de ingeniería de la Universidad de Carabobo	30
3.6. Probetas embutidas y probetas a aplicarle estudio metalográfico	31

3.7. Representación de perfil de doblado indicando los puntos de ensayo de dureza	31
3.8. Durómetro perteneciente al laboratorio de materiales de la facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo	32
3.9. Maquina Galdabini modelo CTM20 usado para el ensayo de tracción, del laboratorio de materiales de la facultad de ingeniería, Universidad de Carabobo	32
3.10. Probeta para ensayo de tracción de acuerdo a la norma ASTM E8M	33
3.11. Probetas resultantes del ensayo destructivos de tracción	33
3.12. Probetas usadas en el ensayo de doblado en "V"	34
3.13. Dimensiones de la probeta de doblado según las condiciones dimensionales de la matriz	34
3.14. Probetas después del ensayo de doblado	34
3.15. Banco de pulido usado en el análisis metalográfico	36
3.16. Esquema de las probetas utilizadas para los ensayos de tracción y doblado	37
3.17. Esquema del plan de trabajo para la determinación de la recuperación elástica en función del sentido de laminación para ambos materiales	38
4.1.A Microscopia Óptica en Acero ASTM A-569 400X (Paralelo al sentido de laminación)	42
4.1.B Microscopia Óptica en Acero ASTM A-569 400x (Perpendicular al sentido de laminación)	42
4.1.C Microscopia Óptica en Aluminio 3003 H-14 400x (Paralelo al sentido de laminación)	42
4.1.D Microscopia Óptica en Aluminio 3003 H-14 400x (Perpendicular al sentido de laminación)	42
4.1.C Microscopia Óptica en Acero ASTM A-36 400x (Paralelo al sentido de laminación)	43
4.1.D Microscopia Óptica en Acero ASTM A-36 400x (Perpendicular al sentido de laminación)	43
4.2. Gráfica esfuerzo- deformación material Aluminio 3003 H-14 espesor 3 mm y paralelo al sentido de laminación	44
4.3. Gráfica esfuerzo- deformación material Aluminio 3003 H-14 espesor 3 mm y perpendicular al sentido de laminación	44
4.4. Gráfica esfuerzo- deformación material Aluminio 3003 H-14 espesor 1,9 mm y paralelo al sentido de laminación	45
4.5. Gráfica esfuerzo- deformación material Aluminio 3003 H-14 espesor	45

1,9 mm y perpendicular al sentido de laminación	
4.6. Gráfica esfuerzo- deformación material Acero ASTM A-569 espesor 3 mm y perpendicular al sentido de laminación	46
4.7. Gráfica esfuerzo- deformación material Acero ASTM A-569 espesor 3 mm y paralelo al sentido de laminación	46
4.8. Gráfica esfuerzo- deformación material Acero ASTM A-36 espesor 5 mm y paralelo al sentido de laminación	47
4.9. Gráfica esfuerzo- deformación material Acero ASTM A-36 espesor 5 mm y perpendicular al sentido de laminación	47
4.10. Doblado en "V" Aluminio 3003 H-14 (1,9mm) Perpendicular al sentido de laminación	54
4.11. Doblado en "V" Aluminio 3003 H-14 (1,9mm) Paralelo al sentido de laminación	54
4.12. Doblado en "V" Aluminio 3003 H-14 (3mm) Perpendicular al sentido de laminación	55
4.13. Doblado en "V" Aluminio 3003 H-14 (3mm) Paralelo al sentido de laminación	55
4.14. Doblado en "V" Acero ASTM A-569 (3mm) Perpendicular al sentido de laminación	56
4.15. Doblado en "V" Acero ASTM A-569 (3mm) Paralelo al sentido de laminación	56
4.16. Doblado en "V" Acero ASTM A-36 (5mm) Perpendicular al sentido de laminación	57
4.17. Doblado en "V" Acero ASTM A-36 (5mm) Paralelo al sentido de laminación	57
4.18. Representación del perfil de doblado donde se tomaron los valores de microdureza Vickers.	59

Índice de tablas

4.1.1. Composición química del aluminio 3003 H-14	41
4.1.2. Composición química del acero al carbono ASTM A-36	42
4.1.3. Composición química del acero al carbono ASTM A-569	42
4.2. Esfuerzos de tracción en Aluminio 3003 H-14 para distintos espesores y sentido de laminación	49
4.3. Esfuerzos de tracción en Acero ASTM A-569 y Acero ASTM A-36	50
4.4. Esfuerzos de fluencia y deformación unitaria Aluminio 3003 H-14 para distintos espesores y sentido de laminación	51
4.5. Esfuerzos de fluencia y deformación unitaria en Aceros ASTM A-569 y ASTM A-36	52
4.6. Módulos de elasticidad en Aluminio 3003 H-14 para distintos espesores y sentido de laminación	53
4.7. Módulos de elasticidad en Aceros ASTM A-569 y ASTM A-36 para distintos espesores y sentido de laminación	53
4.8. Resultados de las cargas experimentales obtenidas en el doblado en Aceros	58
4.9. Resultados de las cargas experimentales obtenidas en el doblado en Aluminio 3003 H-14	58
4.10.A. Valores de dureza para aluminio con espesor 1.9 mm (Paralelo Sentido Laminación)	59
4.10.B. Valores de dureza para aluminio con espesor 3 mm (Paralelo Sentido de laminación)	59
4.10.C. Valores de dureza para aluminio con espesor 1.9 mm (Perpendicular Sentido Laminación)	60
4.10.D. Valores de dureza para aluminio con espesor 3 mm (Perpendicular Sentido Laminación)	60
4.10.E. Valores de dureza para Acero ASTM A-36 con espesor 5 mm	60

(Paralelo sentido laminación)	
4.10.F.Valores de dureza para Acero ASTM A-36 con espesor 5 mm (Perpendicular sentido laminación)	60
4.10.G.Valores de dureza para Acero ASTM A-569 con espesor 3 mm (Paralelo sentido laminación)	60
4.10.H.Valores de dureza para Acero ASTM A-569 con espesor 3 mm (Perpendicular sentido laminación)	60
4.11.A.Determinación del factor de forma para láminas de Aluminio 3003 H-14 de 1,9 mm de espesor, en matriz de doblado en forma de “V”	62
4.11.B.Determinación del factor de forma para láminas de Aluminio 3003 H-14 de 3 mm de espesor, en matriz de doblado en forma de “V”	62
4.11.C.Determinación del factor de forma para láminas de Acero ASTM A-569 de 3 mm de espesor, en matriz de doblado en forma de “V”	63
4.11.D.Determinación del factor de forma para láminas de Acero ASTM A-36 de 5 mm de espesor, en matriz de doblado en forma de “V”	64
4.12. Ángulo final de la pieza doblada después del doblado en “V” para los aceros ASTM A-569 y ASTM A-36	65
4.13. Ángulo final de la pieza doblada después del doblado en “V” para un aluminio 3003 H-14	67
4.14. Valores de K_r y $\Delta\beta$ para doblado en “V” para el material ASTM A-569	67
4.15. Valores de K_r y $\Delta\beta$ para doblado en “V” para el material ASTM A-36	67
4.16. Valores de K_r y $\Delta\beta$ para doblado en “V” para el material Aluminio 3003 H-14	68
4.17. Valores de K_r y $\Delta\beta$ para doblado en “V” para el material Aluminio 3003 H-14	69
4.18. Valores teóricos de la recuperación elástica para los aceros ASTM A-569 (3mm) y ASTM A-36 (5mm)	69
4.19. Valores teóricos de la recuperación elástica para Aluminio 3003 H-14	70
4.20. Valores de radio final y ángulo final promedio según material, espesor y sentido de laminación	70
4.21. Ubicación de la línea neutral con relación al radio del punzón y espesor de la lámina	

CAPÍTULO 1

Introducción

Este capítulo contiene una descripción general que justifica la realización del presente trabajo especial de grado y los objetivos que fueron alcanzados.

1.1 Introducción

Los procesos de conformado de hoja o lámina metálica están entre las más versátiles de todas las operaciones. Se suelen aplicar en piezas que tienen grandes relaciones de área a espesor. A diferencia de los procesos de deformación en volumen, como el forjado y la extrusión, en general el conformado de láminas evita reducir el espesor del material para evitar la estrangulación y el rasgado. El doblado es una de las operaciones más comunes de formado. Tan solo observar alrededor podemos encontrar siempre una cantidad innumerable de objetos que son fabricados e intervenidos por este proceso. Para la ejecución de dicho proceso se deben tomar en consideración algunas variables entre las cuales se encuentran la recuperación elástica.

Ésta variable posee distintas nomenclaturas conocidas también como “restitución” (en Inglés, *springback*). Este fenómeno viene acompañado con

las propiedades mecánicas del material y se presenta cuando se elimina la carga aplicada o fuerza de doblado y es cuando el material presentará entonces un grado de recuperación con respecto a su posición final (Kalpakjian y Schmid, 2002).

En resumen, el análisis fue realizado a través de gráficas y ecuaciones, estableciendo valores teóricos y experimentales. En los resultados obtenidos se pudo notar que la recuperación elástica se ve influenciada por el material, espesor y sentido de laminación.

Básicamente este trabajo está dividido en cinco capítulos:

Capítulo I; comprende el problema, objetivo general, objetivos específicos, limitaciones y plan de trabajo.

Capítulo II; está formado por los antecedentes de la investigación y fundamentos teóricos.

Capítulo III; se divide en nivel de la investigación y diseño de la investigación.

Capitulo IV; muestra los resultados obtenidos y los análisis de la investigación.

Capitulo V; se encuentran las conclusiones y recomendaciones.

1.2 Situación Problemática

La empresa ENCAVA C.A. ubicada en Valencia Edo. Carabobo, empresa venezolana dedicada a la fabricación y ensamblaje de autobuses, constituida aproximadamente por novecientos trabajadores, los cuales se distribuyen en setecientos cuarenta a nivel operativo (operarios) y ciento sesenta trabajadores a nivel administrativo (empleados), está compuesta por un conjunto de departamentos entre los cuales se destacan el departamento de ingeniería, control de calidad, planificación, manufactura y el departamento

de piezas metálicas. En éste último departamento es donde se procesan, se fabrican las piezas y se llevan a cabo todas las operaciones de conformado de piezas entre las cuales se pueden mencionar corte (prensas o CNC), punzonado (prensas o CNC), doblado (CNC), entre otros. Actualmente en el departamento de piezas metálicas no existe un proceso adecuado de selección de herramientas para el proceso de doblado; por lo tanto, no se ejecuta de manera óptima dicho proceso. La empresa toma como referencia para el proceso de doblado un factor de 1.5 x espesor, como radio interno final de doblez, indiferentemente del sentido de laminación y del material. Adicionalmente éste factor se ha ido acotando en todos los planos que emite el departamento de ingeniería de las piezas a fabricar por el departamento de piezas metálicas y no poseen bases o registros acerca de este factor que describan su aprobación para el uso en todas las piezas a desarrollar y fabricar; en consecuencia, arrojando incertidumbre en los ensayos que ejecuta la empresa. De igual manera para el uso de los herramientas no se tiene un criterio establecido de acuerdo al diseño de la pieza, que contribuya a maximizar la vida útil de los herramientas.

Por lo que la empresa requiere establecer una metodología de trabajo para el diseño, representación (planos) y fabricación de piezas, utilizando como maquinarias prensas de cortes (cizallas), punzonadoras y dobladoras a partir de las condiciones de operación antes mencionadas.

En el proceso de doblado es importante controlar varios parámetros, se utilizan como herramientas de trabajo distintos punzones y matrices para generar diferentes formas en las láminas a doblar.

El radio interno final es un parámetro de operación en donde se manifiestan algunos fenómenos intrínsecos del proceso. En vista que para su determinación puede llevar a un procedimiento experimental, se pretende establecer que para distintos espesores y utilizando el proceso de doblado,

obtener información precisa de algunas variables como son la recuperación elástica del material según el sentido de laminación.

Como resultado del proceso de doblado se obtiene una pieza con un ángulo inducido, aunque no tan obvio, ocurre un incremento en el radio interno final de doblado debido a la recuperación elástica.

Se evaluaron tres materiales, en su mayoría son los más utilizados en las piezas procesadas, el acero ASTM A36, ASTM A-569 y aluminio 3003 H-14, de varios espesores de tal forma de agregar mayor precisión al estudio (ASTM A-36: 5mm, ASTM A-569 3 mm – Aluminio: 1.9, 3 mm); para una matriz en “V” de ángulo recto.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Determinar experimentalmente la recuperación elástica de piezas dobladas en función del sentido de laminación en aceros ASTM A36, ASTM A-569 y aluminio 3003 H-14.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Obtener los valores de fuerza de doblez según tipo de material y sentido de laminación.
- Obtener los valores de dureza para los diferentes sentidos de laminación, tipos de materiales y espesores.
- Determinar el factor de forma del doblado para los aceros ASTM A36, ASTM A-569 y aluminio 3003 H-14.
- Establecer la recuperación elástica de la pieza final en aceros ASTM A36, ASTM A-569 y aluminio 3003 H-14 mediante el instrumento de medición goniómetro.

- Determinar el radio interno final de las piezas según la recuperación elástica en función del sentido de laminación.

1.4 Justificación

Con la realización de este trabajo de investigación se pretenden establecer las bases teóricas sobre la obtención de los parámetros del proceso de doblado para la empresa ENCAVA C.A. y adquirir una relación factible sobre los resultados obtenidos de manera teórica y práctica para llevar a cabo investigaciones más avanzadas sobre los efectos de los parámetros en el proceso de doblado en cada una de sus piezas a fabricar y de esta manera implantar límites o rangos de trabajo para cada una de las operaciones de doblado.

1.5 Alcance

- Los ensayos de doblado se realizaron con láminas de acero ASTM A-36, ASTM A-569 y aluminio 3003 H-14.
- Se utilizaron cuatro tipos de espesores de láminas para las pruebas de doblado y tracción con espesores menores a 6mm (según disponibilidad de muestras suministradas por la empresa), para ambos sentidos de laminación (perpendicular y paralelo) por lo que sumaron un total de 64 muestras.

1.6 Limitaciones

- Los ensayos fueron realizados en los equipos disponibles en el taller de procesos metalmecánicos y laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo.

6 Determinación experimental de la recuperación elástica de piezas dobladas en función del sentido de laminación en aceros ASTM A36, ASTM A-569 y aluminio 3003 H-14.

- La matriz utilizada para el proceso de doblado fue en forma de “V” con ángulo recto.
- Disponibilidad de la empresa para el suministro de muestras requeridas para el estudio.

CAPÍTULO 2

Bases Teóricas

2. Introducción

En éste capítulo se realiza una presentación del campo de aplicación en el que se engloba éste trabajo. Se parte desde una perspectiva sobre las operaciones de doblado general hasta particularizar en el proceso de doblado en “V”. Definiendo los conceptos iniciales y fundamentales relacionados con el proceso de doblado y recuperación, proporcionando las nociones generales relacionadas con el fenómeno de la recuperación.

2.1 Antecedentes de la Investigación

Gardiner (1957) en su trabajo de investigación, desarrolló una ecuación que permitía corregir la recuperación elástica del doblado, tomando en cuenta las propiedades físicas básicas para casi todos los materiales metálicos y los espesores de las piezas a doblar. Para ello se tomaron hipótesis como, el espesor y ancho de la lámina son uniformes y permanecen constantes durante el proceso de doblado, la capa neutra coincide con el plano medio del grosor de la lámina y las curvas de tensión – deformación de una pieza de

trabajo en las regiones de tracción y compresión son simétricas respecto al origen.

Después de realizar muchas pruebas para un determinado material con varios espesores se comprobó la teoría con las pruebas, utilizándose entonces para varios materiales con distintos espesores, mostrando una buena correlación. Esto contribuyó ampliamente a la teoría de la recuperación, ya que trabajos anteriores tenían aplicación para materiales limitados.

Castillo (2003) en su trabajo de grado, ***“Determinación de la zona de material afectada mecánicamente, según la variación de los parámetros característicos, en el proceso de doblado”*** tuvo como objetivo establecer las diferencias entre la longitud de la zona de material que resulta afectada si se realiza el doblado con diferentes niveles de las variables. La longitud de la zona afectada se incrementa a medida que aumenta el espesor y disminuye a medida que aumenta el radio. Así como también a medida que se disminuye el ángulo entre los lados del doblado, aumenta la longitud de la zona afectada para cualquiera de los espesores, para el mayor de ellos ésta influencia fue notable. En general los tres parámetros estudiados (espesor de material, radio del punzón y ángulo entre los lados del doblado) afectan mecánicamente el material en la zona en que se realiza el doblado.

García (2005) en su trabajo doctoral, ***“Contribución al estudio del proceso de doblado al aire de lámina modelo de predicción de ángulo de recuperación y del radio de doblado final”*** realizó un nuevo método de medición para cuantificar el valor del radio final de doblado y el valor del ángulo de doblado, basado en la red neural de la variable de radio final de doblado. El modelo puede ser utilizado como paso previo para una simulación con elementos finitos, pues permite reducir el número de iteraciones antes de encontrar la solución definitiva, ésta técnica de predicción permite disminuir los tiempos dedicados a los ensayos de prueba y error.

Fuh- Kuo Chen y Shen- Fu Ko (2006) publicaron un artículo donde se realizó el estudio al efecto de doblado al aire en “L” de una lámina metálica a la que eventualmente aplicaron un nuevo método de estudio antes poco usado en éste tipo de doblado así como también los análisis experimentales, el estudio aplicado fue el de elementos finitos que conjuntamente a los análisis experimentales podrían reducir de manera drástica la recuperación elástica en el proceso de conformado de metales. En el proceso de investigación apreciaron que para dicho doblado se involucraban tres zonas de fallas catalogándolas por números, en dichas zonas encontraron diversidad en la proporción de la recuperación elástica, según los análisis y las simulaciones señalaron que en dos de las zonas con mayores efecto del fenómeno podrían atacarse en pequeñas zonas de la pieza una cantidad de fuerza extra que podría restar la recuperación elástica final de la pieza, concluyendo entre uno de varios análisis que aplicando el método de elementos finitos a cada pieza y comparando con los resultados experimentales a las piezas se pueden deducir zonas específicas de fallas en las piezas a las que se pueden aplicar la sobrecarga disminuyendo después del doblado la recuperación elástica.

Con el mismo fin de ampliar los conocimientos del fenómeno de la recuperación elástica en los procesos de conformado de laminas Da Silva Botelho, T. et al (2007) presentaron un estudio experimental y numérico en dos dimensiones del fenómeno recuperación elástica en el proceso de conformado de laminas. Definiendo que la predicción de éste fenómeno es importante para evaluar el diseño de herramientas usadas manualmente para el estampado. A fin de validar los parámetros de los materiales, ambos análisis tanto de elementos finitos como experimentales fueron comparados. Esta investigación arrojó una validación muy veraz de los modelos experimental y finito probando que se es capaz de predecir los valores de recuperación elástica. El dispositivo experimental dio resultados fiables acerca del criterio de recuperación elástica para acercarse a las condiciones reales

industriales. Éste modelo es una manera simple y eficiente para tomar decisiones entre los fabricantes de acero (selección de acero) y los diseñadores de procesos de conformado (en la selección de condiciones de conformado).

Valbuena y Urbano (2008) en su trabajo titulado, **“Determinación experimental de la recuperación elástica en el doblado con dado basculante y doblado en “V”, para láminas de acero al carbono AISI 1008”** determinaron experimentalmente la recuperación elástica para el doblado en “V” y doblado con dado basculante en láminas de acero al carbono AISI 1008 en estado recocido, el análisis se hizo mediante gráficas y ecuaciones donde se determinó la carga de doblado tanto experimental como teórico. Se pudo visualizar que la carga de doblado con dado basculante fue mayor que la carga de doblado con el método en “V”. También se determinó la recuperación elástica del material; así como también, se fijó que para mayores espesores de lámina en ambos procesos de doblado implica mayores valores de recuperación elástica.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Operaciones de Doblado

La capacidad de doblado de un material depende de su ductilidad y estos procesos pueden realizarse en frío o en caliente, en función de las características de ductilidad del material o del grado de doblado requerido. El parámetro característico de los procesos de doblado es el *radio de curvatura* que podrá ser tanto más pequeño cuanto más dúctil sea el metal. En ocasiones, las etapas del doblado requieren de un calentamiento previo del material a fin de favorecer su deformación. En estos procesos, sucede que los cristales de la zona más externa quedan sometidos a esfuerzos de tracción, mientras que la zona interna del codo queda sometida a compresión.

En medio, existe una región que no queda alterada (*fibra neutral*) y que para un radio de curvatura grande suele localizarse hacia la mitad del espesor Ballesteros (2005).

En el trabajo de láminas metálicas el doblado se define como la deformación del metal alrededor de un eje recto. Durante la operación de doblado, el metal dentro del plano neutral se comprime, mientras que el metal por fuera del plano neutral se estira. Estas condiciones de deformación se pueden visualizar en la figura 2.1. El metal se deforma plásticamente así que el doblado toma una forma permanente al remover los esfuerzos que lo causaron. El doblado produce poco o ningún cambio en el espesor de la lamina metálica Ledezma (2009).

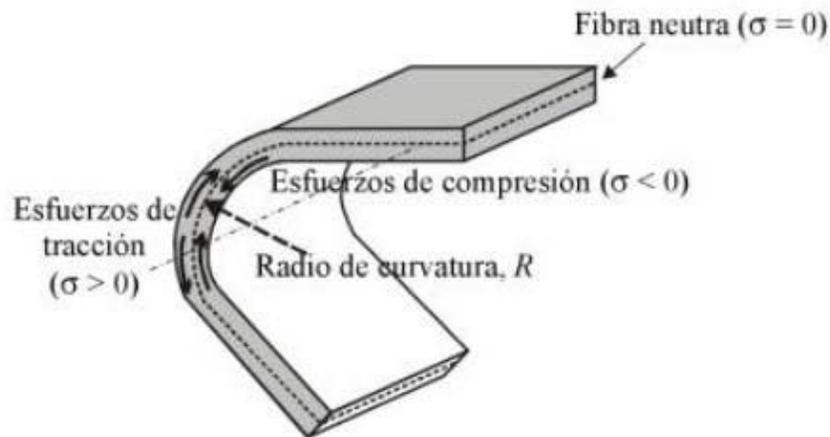


FIGURA 2.1 Localización de las regiones sometidas a tracción o a compresión durante la operación de doblado de un componente metálico. Ledezma (2009).

2.2.2 Tipos de Doblado

Existen varios tipos de doblado, esto por su parte va a depender en gran parte de la geometría de la matriz y punzón, por lo que de ese modo puede clasificarse, de igual manera la disposición de los elementos necesarios para

realizar el proceso de doblado puede modificar los resultados obtenidos en el mismo.

a) Doblado al Aire

En el doblado al aire la función de la herramienta es simplemente la de transmitir las fuerzas y los momentos a la pieza de trabajo. De hecho, en el doblado al aire prácticamente solo se transmite un momento flector a la pieza, motivo por lo que se considera un doblado de momento puro.

Existen principalmente dos tipos de procesos de doblado al aire; entre los cuales se tienen:

- Doblado al aire en tres puntos, en el cual la lámina se soporta entre dos apoyos en lados opuestos, un punzón la deforma posicionándose en la mitad de la lámina.
- Doblado al aire con dado deslizante, en el que la lámina sujeta a lo largo de una arista se dobla por un punzón que deforma la lámina a lo largo de la otra arista libre.

El doblado al aire empieza en el momento en que el punzón establece contacto con la lámina y se completa cuando las alas de la pieza de trabajo son tangentes a las caras de la matriz o cuando el radio interno más pequeño de la pieza de trabajo se vuelve menor que el radio del punzón. En ambos casos la geometría de la herramienta afecta a la deformación posterior de la lámina. Al final del doblado al aire, la forma de la porción curvada de la lámina no está definida completamente; por consiguiente, la lámina no se presiona completamente contra la matriz. La geometría de la herramienta imprime una pequeña información de forma, pues que pueden producirse varios ángulos con la misma combinación de matriz y punzón sobre diferentes materiales y diferentes espesores, ajustando únicamente el desplazamiento del punzón.

Éste hecho convierte al doblado al aire en un proceso muy flexible y hace que se le considere también un proceso muy eficiente; por tanto, la independencia del tipo de material y el ángulo a conseguir limita el número de cambios de herramienta.

Se requiere una fuerza de presión baja comparada con la del doblado en “V”. Por éste motivo, las maquinas necesarias para éste proceso son menos potentes. En éste tipo de doblado la forma final de la pieza de trabajo no es únicamente función de la geometría y de los componentes de la herramienta (punzón y apoyos) durante el proceso, sino también de la curva característica del material de trabajo y del espesor de la lámina.

b) Doblado en “V”

El doblado en matriz en “V” implica el doblado de la lámina entre el punzón y la matriz hasta que la pieza de trabajo toma contacto con los lados de la matriz.

El doblado en “V” se puede ejecutar en moldes cerrados, esto significa que el fondo de la matriz tiene un radio igual a la suma del radio del punzón más el espesor de la lámina, también se puede ejecutar en una matriz semicerrada, en la que el fondo de la matriz tiene un radio menor que el radio del punzón mas el espesor de la lámina (la matriz tiene la forma de una “V” puntiaguda, véase fig. 2.2). Para el caso en que la curvatura interna de la pieza sea menor que la curvatura del punzón, no se podrá efectuar en matrices semicerradas, pues no se podrá producir la curvatura interior de la lámina para que se amolde al punzón por acuñación.

En los proceso de doblado en “V”, el punzón presiona la lámina completamente contra la matriz. Como resultado, las características de doblado (ángulo y radio) están marcadas por la combinación matriz y punzón. Cada espesor de lámina, tipo de material y ángulo de doblado requieren una

combinación diferente de punzón y matriz. Consecuentemente, se deben adquirir muchas herramientas.

En el doblado en “V”, la lámina de metal se dobla entre un punzón y un dado en forma de “V”, los ángulos van desde los muy obtusos hasta los muy agudos. El doblado en “V” se usa generalmente para operaciones de baja producción y se realizan frecuentemente en una prensa de cortina, los correspondientes dados en “V” son relativamente simples y de bajo costo. Luna (2001).

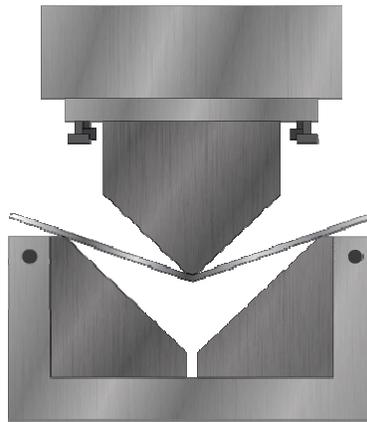


FIGURA 2.2 Representación de doblado en “V”. Fuente propia.

c) Doblado en “U”.

El doblado en “U”, al igual que los otros procesos de doblado, es un proceso de deformación de material por medio de la aplicación de una fuerza externa sobre una lámina plana apoyada sobre bases a través de un punzón, en donde se usan elementos como los mostrados en la fig. 2.3.a. El material toma la forma de la matriz en “U”. Al inicio del proceso la lámina metálica es completamente plana, sufre la deformación plástica por la aplicación de fuerza a través de un punzón y pasa de ser plana a tomar completamente la forma de la matriz, por medio de un proceso similar al mostrado en figura 2.3.b.

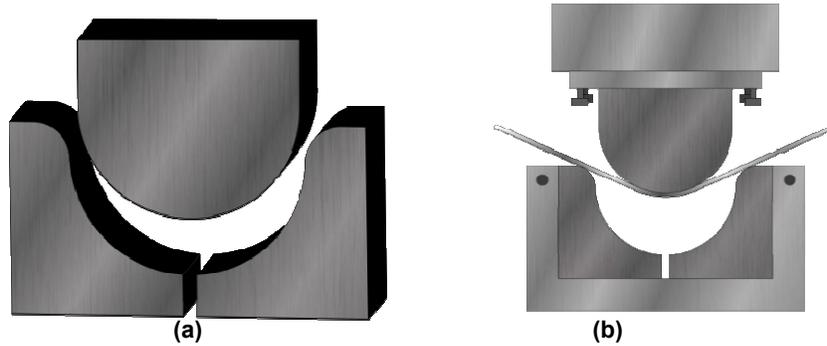


FIGURA 2.3 (a) Representación de matriz y punzón correspondiente a un doblado en “U”. (b) Lamina durante la deformación en el doblado en “U”. Fuente propia.

2.2.3 Parámetros Relacionados con el Doblado

a) Holgura o Tolerancia en el Doblado

Como puede observarse en la figura 2.4, la longitud del eje neutro en el doblado se usa para determinar la longitud de la pieza bruta con que se fabrica una pieza doblada. Sin embargo, la posición del eje neutro depende del radio y del ángulo de doblado. Una fórmula aproximada de la holgura de doblado, L_b , es la siguiente:

$$L_b = \alpha(R + kt) \quad (2.1)$$

Donde α es el ángulo de doblado (en radianes), t es el espesor de la lámina, R es el radio de doblado y k es una constante. Para el caso ideal, el eje neutro está en el centro del espesor de la lámina; $k = 0.5$, y entonces

$$L_b = \alpha \left[R + \left(\frac{t}{2} \right) \right] \quad (2.2)$$

En la práctica los valores de k suelen ser de 0,33 (para $R < 2t$) a 0.5 (para $R > 2t$).

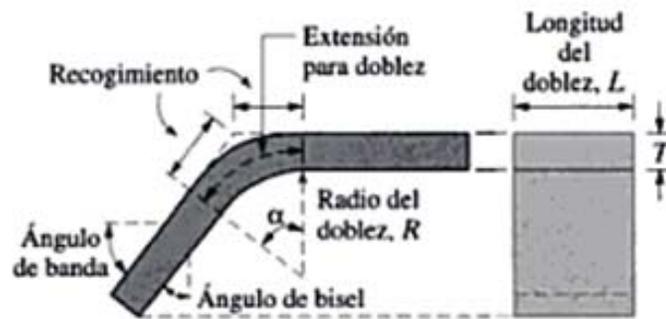


FIGURA 2.4 Terminología del doblado. Kalpakjian 2002.

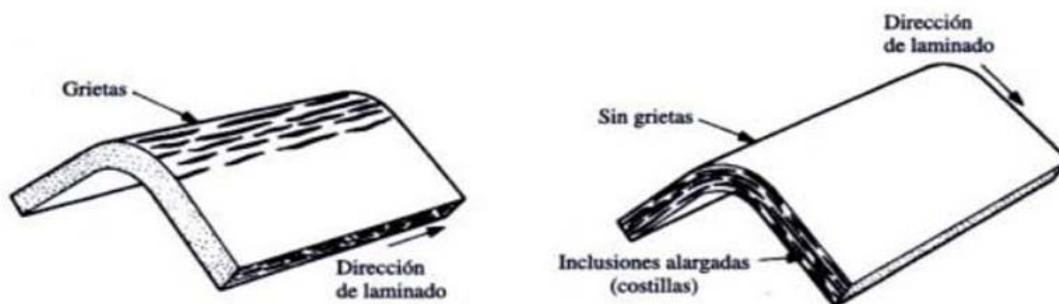


FIGURA 2.5 (a) y (b) Efecto de las inclusiones alargadas (longitudinales) sobre el agrietamiento, en función de la dirección del doblado con respecto a la dirección del laminado original de la hoja. Kalpakjian 2002.

Generalmente, las tensiones de tracción de la región externa superan el valor de resistencia de tensión del material, con lo cual se produce estricción y se aprecia una pérdida de brillo en esa zona del componente provocada por la fluencia irregular. La reducción de sección de la región que sufre estricción permite que el material incremente su longitud y pueda deformarse hacia los lados.

La zona interna, sometida a esfuerzos de compresión, sufre un incremento de sección, acompañado de una disminución de longitud. De ésta forma, el exceso de material que se localiza en la región interna se compensa con la falta que se ha generado en la región interna y se mantiene la sección global del componente.

El radio de curvatura, R , que se puede imponer en una pieza en un proceso de doblado dependerá de varios factores, como son:

La ductilidad del material: \uparrow ductilidad $\rightarrow \downarrow R$.

El espesor del perfil a doblar: \uparrow espesor $\rightarrow \uparrow R$

Cuando las fibras son paralelas al plano de flexión precisan valores de R menores que cuando las fibras están orientadas perpendicularmente.

La temperatura del proceso de conformado: \uparrow Temperatura $\rightarrow \downarrow R$.

Otro parámetro a tener en cuenta en el doblado es que los materiales tienen una recuperación elástica; es decir, que aunque se deformen permanentemente suelen retroceder hacia una antigua posición algunos grados. Por eso al doblarse se debe hacer con unos grados de exceso para compensar este efecto.

b) Recuperación Elástica.

Cuando la presión de doblado se retira, la energía elástica permanece en la parte doblada haciendo que esta recobre parcialmente su forma original. La recuperación elástica se define como el incremento del ángulo comprendido por la parte doblada en relación con el ángulo comprendido por la herramienta formadora después de que esta se retira. Esto se ilustra en la figura 2.6 y se expresa como:

$$SB = \frac{A' - A'_b}{A'_b} \quad (2.3)$$

Donde:

SB = recuperación elástica.

A' = ángulo comprendido por la lamina de metal; medido en grados.

A'_b = ángulo comprendido por la herramienta de doblado, medido en grados.

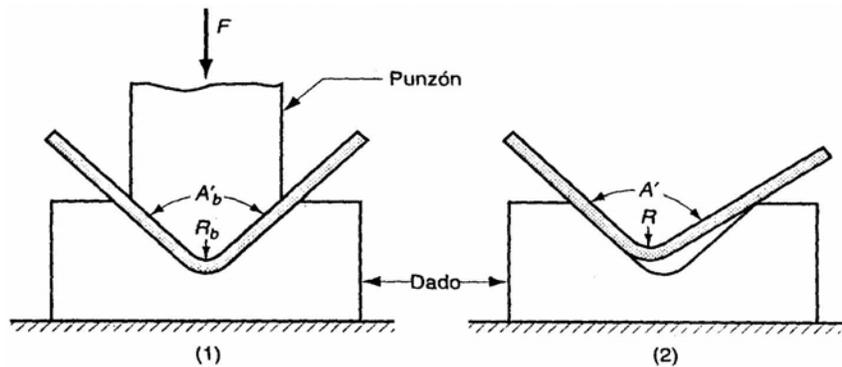


FIGURA 2.6 La recuperación elástica en el doblado. (1) Durante la operación de doblado, (2) una vez que se ha retirado el punzón. Ledezma (2009).

Aunque no tan obvio, ocurre un incremento en el radio de doblado debido a la recuperación elástica. La magnitud de la recuperación elástica se incrementa por el módulo de elasticidad E y la resistencia a la fluencia del metal de trabajo.

Se puede lograr una compensación para la recuperación elástica por varios métodos, dos métodos comunes son el sobre doblado y el fondeado. En el *sobre doblado*, el ángulo del punzón y su radio se fabrican ligeramente menores que el ángulo especificado en la parte final, de manera de que la lámina regrese al valor deseado. El *fondeado* involucra comprimir la parte al final de la carrera deformándola plásticamente en la región de doblado Ledezma (2009).

c) Fuerza de Doblado

Se pueden calcular las fuerzas de doblado suponiendo que el proceso es de flexión simple de una viga rectangular. La fuerza de doblado, en éste caso, es una función del esfuerzo de fluencia del material, la longitud L del doblez, el espesor t de la lámina, y el tamaño W de la abertura del dado (fig. 2.8). Sin incluir la fricción, la fuerza máxima de doblado (Kalpakjian 2002), es:

$$F_{max} = \frac{kS_y L t^2}{W} \quad (2.4)$$

Donde el factor k va desde 0.3 aproximadamente, para un dado deslizante, pasando por 0.7 aproximadamente, para un dado “U”, hasta 1.3 para una matriz en “V”

Para un dado en V, se suele aproximar la ecuación anterior como sigue:

$$F_{max} = \frac{(S_{max})kL t^2}{W} \quad (2.5)$$

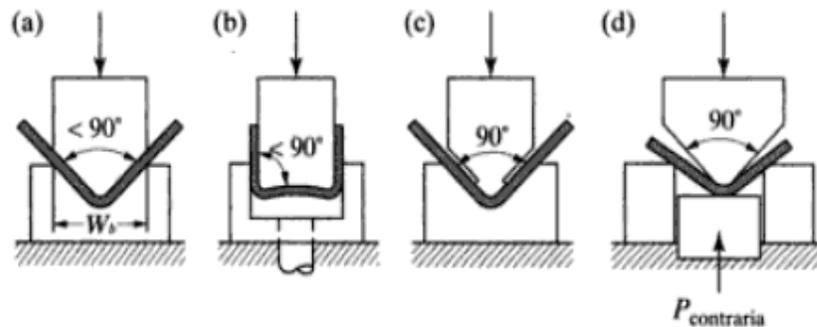


FIGURA 2.7 Métodos para reducir o eliminar la restitución en las operaciones de doblado. Kalpakjian 2002.

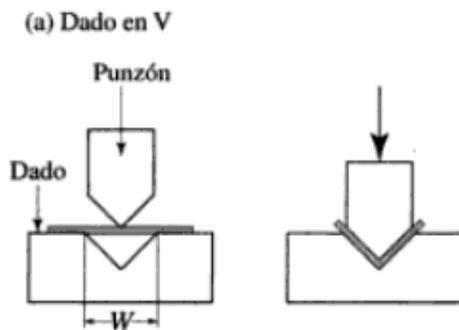


FIGURA 2.8 Operaciones comunes en doblado con matriz en “V” indicando la dimensión de abertura del dado W . Kalpakjian 2002

Donde S_{max} es el esfuerzo máximo de tensión del material. La ecuación (2.5) se aplica bien a casos en los que el radio del punzón y el espesor del material son pequeños, en comparación a la abertura W del dado.

La fuerza de doblado también es función del avance del punzón en el ciclo de doblado. Sube de cero hasta un máximo y hasta puede disminuir al ir completando el doblado; después aumenta bruscamente cuando el punzón llega al fondo de su carrera durante el doblado con dado. En el doblado al aire o doblado libre, la fuerza no vuelve a aumentar después de iniciar su decrecimiento Kalpakjian (2002).

d) Radio Mínimo de Doblez

Se llama radio de mínimo de doblado al radio en el cual una grieta aparece en la superficie más exterior del doblado. El radio mínimo de doblado al que una pieza puede doblarse de manera segura se expresa habitualmente en función del espesor, como por ejemplo $2t$, $3t$, $4t$, etc. El radio mínimo de doblado se determina tradicionalmente de manera experimental y está disponible como característica de la lámina en forma de tabla en varios manuales.

2.2.4. Recuperación o “Springback”

El término recuperación (springback) es uno de los parámetros principales asociados al proceso de doblado y a la vez, uno de los factores fundamentales que afectan la calidad de un componente estampado. La recuperación se define como el movimiento que se produce en una pieza para intentar recuperar su posición original después de una operación de deformación.

El doblado es una operación que se usa comúnmente en la fabricación de un número importante de piezas de lámina. Muchas operaciones de conformado por deformación implican el doblado de materiales ferrosos y no ferrosos, de láminas de diferentes espesores, de barras con cualquier tipo de sección y de alambres que se utilizan para dar forma a piezas que

posteriormente se ensamblarán. El que se produzca recuperación incontrolada en los dobleces, provoca dimensiones inaceptables y problemas de montaje, afectando de manera adversa a la calidad del producto final. Además, el carácter no constante de la recuperación se añade a las dificultades para obtener productos de calidad constante. Cuando se estudia el fenómeno de la recuperación se diferencian claramente dos estados, como es mostrado en la figura 2.9.

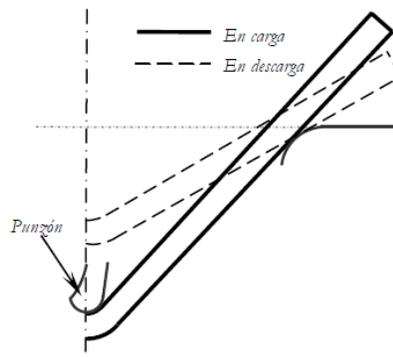


FIGURA 2.9 Definición de estados para estudio de la recuperación. García (2005).

- a. Estado inicial o en carga. Durante ésta etapa de conformado, el punzón está ejerciendo una fuerza de doblado sobre la lámina.
- b. Estado final o de descarga. Esta etapa comienza desde el momento en el que la carga, que esta aplicada por una prensa, se deja de ejercer sobre la lámina. Es durante la fase de descarga cuando una porción de la deformación se recupera causando un cambio en la forma de la pieza final, García (2005).

2.2.7. Definiciones Iniciales de Recuperación.

El ángulo final de doblado (β_f) después de la recuperación es menor al que tenía la lámina mientras estaba sometida al esfuerzo del punzón (β_i).

$$\beta_f < \beta_i \quad (2.6)$$

Por lo tanto, la curvatura disminuye durante la recuperación y consecuentemente el radio de doblado final (R_f) es mayor que el radio de doblado bajo carga (R_i).

$$R_f > R_i \quad (2.7)$$

Para cuantificar la recuperación, es conveniente la definición de una relación adimensional que permita medirla. El factor de recuperación se basa en relaciones entre los valores de ángulo de doblado en carga (β_i) y en descarga (β_f), o bien mediante relaciones entre los valores del radio en (R_i) y final o en descarga (R_f). Como un posible parámetro para cuantificar la recuperación, se define el factor de recuperación K_r como coeficiente entre ángulos de doblado.

$$K_r = \frac{\beta_f}{\beta_i} = \frac{R_f}{R_i} = \frac{A}{A_1} = \frac{R_1 + t/2}{R + t/2} \quad (2.8)$$

El valor K_r igual a la unidad indicara la ausencia de recuperación, mientras que un valor igual a cero indicara una recuperación elástica completa.

Donde:

A: Angulo de doblado de la pieza en grados.

A_1 : Angulo de doblado de la pieza durante la conformación en grados.

R: Radio de doblez de la pieza.

R_1 : Radio de la matriz.

t: Espesor del metal.

Otras aproximaciones cuantifican la recuperación como la diferencia angular entre los ángulos en el estado de carga y descarga (figura 2.10),

donde θ es el ángulo de doblado interior, comprendido entre las alas de pieza doblada teniendo como parámetro valorativo el ángulo de recuperación $\Delta\beta$ ó $\Delta\theta$, que se define como:

$$\beta_i = \beta_f + \Delta\beta \text{ ó } \Delta\theta, \text{ siendo } \Delta\beta = -\Delta\theta \quad (2.9)$$

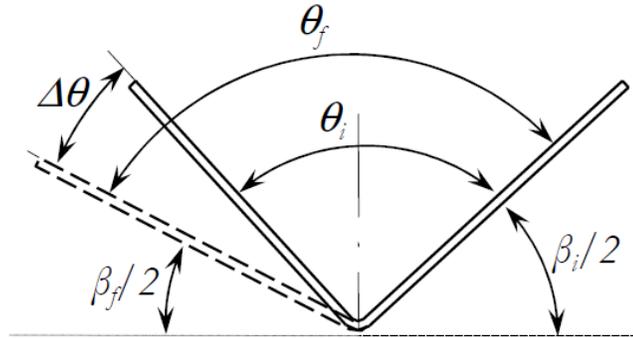


FIGURA 2.10 Variación del ángulo $\Delta\theta$ durante la recuperación de una lámina en “V”.
García (2005).

Relacionar el factor de recuperación y el ángulo de recuperación puede resultar fácil. Si el valor K_r se conoce, por ejemplo de forma experimental, el ángulo de recuperación se puede determinar por:

$$\Delta\beta = \left(\frac{1}{K_r} - 1\right) \beta_f \quad (2.10)$$

$$\Delta\theta = (1 - K_r) \theta_f \quad (2.11)$$

Estas ecuaciones solo pueden aplicarse en situaciones de doblado ideal, donde la curvatura se mantenga constante a lo largo de toda la longitud de doblado García (2005).

Para algunos casos es usado el coeficiente adimensional R_i/R_f . Aunque comúnmente R_i/R_f se le puede definir como “relación de recuperación” y se le puede llamar de manera más adecuada “relación de conformidad”. Es el índice mediante el cual la sección doblada se ajusta a la forma de la matriz, ó a la forma en carga en caso de doblado al aire, después de la

descarga. Igual que el factor de recuperación K_r , se puede determinar en términos de radios R_i y R_f . Considerando que la longitud de arco deformado es la misma antes y después de la carga, la relación que se obtiene bajo condiciones de doblado ideal, es:

$$\left(R_i + \frac{t}{2}\right) \beta_i = \left(R_f + \frac{t}{2}\right) \beta_f \quad (2.12)$$

A partir de la relación (2.12) se obtiene una expresión para K_r como:

$$K_r = \frac{\beta_f}{\beta_i} = \frac{\left(\frac{2R_i}{t}\right)^{+1}}{\left(\frac{2R_f}{t}\right)^{+1}} \quad (2.13)$$

En esta expresión se observa que el factor de recuperación depende solamente de la relación R/t .

Definimos de nuevo la cantidad de recuperación elástica, pero esta vez incluyendo las propiedades del material que gobierna su comportamiento elástico. En este caso el factor de recuperación depende del nivel de tensión ó esfuerzo de fluencia del material (S_y) y del modulo de elasticidad del material (E). De este modo la recuperación elástica aumenta con el nivel de tensión y con la disminución del modulo elástico.

Basándose en esta observación, una formula aproximada se desarrolla para estimar la recuperación es la siguiente:

$$\frac{R_i}{R_f} = 4 \left(\frac{R_i S_y}{E t}\right)^3 - 3 \left(\frac{R_i S_y}{E t}\right) + 1 \quad (2.14)$$

2.2.8. Variables de Influencia sobre la Recuperación

El efecto de influir sobre determinadas variables que aumentan la recuperación viene marcado, en una primera aproximación, por el ratio R/t y el ratio S_y/E , tal como se puede observar en la ecuación (2.14). De manera que se consideran como tendencias clásicas en el aumento de la recuperación las consecuencias que se enumeran a continuación.

- El aumento del esfuerzo de fluencia (S_y).
- La disminución del grosor de la lámina (t).
- El aumento del radio de doblado (R).
- La disminución del modulo de elasticidad (E).
- El aumento del modulo tangente (pendiente de la curva esfuerzo/deformación real) cuando se ha excedido el esfuerzo de fluencia (S_y).

La recuperación también se ve influenciada de manera muy importante por el factor geométrico que viene definido por el propio ángulo que se quiere alcanzar. Así que cuanto mayor sea el ángulo de doblado que pretenda alcanzarse, mayor será la recuperación.

CAPÍTULO 3

Marco Metodológico

3. Introducción

En éste capítulo se plantearon los pasos que se siguieron durante la investigación con la finalidad de cumplir con los objetivos propuestos y a su vez describir brevemente las técnicas y herramientas que se utilizaron durante el proceso de investigación.

3.1. Nivel de la Investigación

El trabajo de investigación presentado es experimental de carácter descriptivo, ya que se examinó el comportamiento de tres materiales (Acero ASTM A36, Acero ASTM A-569 y Aluminio 3003 H-14) sometidos al proceso de doblado en “V”, específicamente en la determinación de la recuperación elástica por medio del ángulo de doblado final y el factor de recuperación, cuando se tienen distintos espesores y sentido de laminación. Se dice que es explicativa ya que al obtener los resultados por medio de la realización de los ensayos de doblado, se establecieron comparaciones entre los diferentes sentidos de laminación y materiales usados.

3.2. Diseño de la Investigación

En el marco de la investigación planteada, cuyo objetivo central se encuentra referido a cuantificar la recuperación elástica que soporta la pieza (ángulo de doblez final) sometida a doblado en “V” en láminas de Acero ASTM A36, Acero ASTM A-569 y Aluminio 3003 H-14 de acuerdo al sentido de laminación a distintos espesores.

3.2.1. ETAPA 1. Preparación de las probetas para los ensayos de tracción y doblado en “V”.

Las probetas fueron donadas por la compañía ENCAVA, C.A. y fueron cortadas según especificaciones y requerimientos usando la NORMA ASTM E-8M B557M. Cabe destacar que las probetas tanto para ensayo de tracción como doblado fueron cortadas en dos sentidos tal como se representa en la figura 3.1.

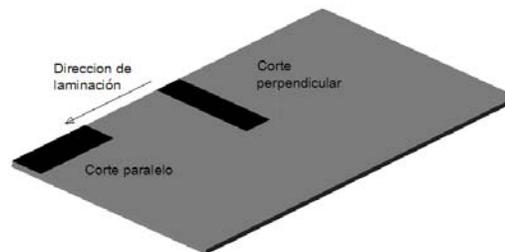


FIGURA 3.1 Cortes para la elaboración de muestras según la dirección de laminación.

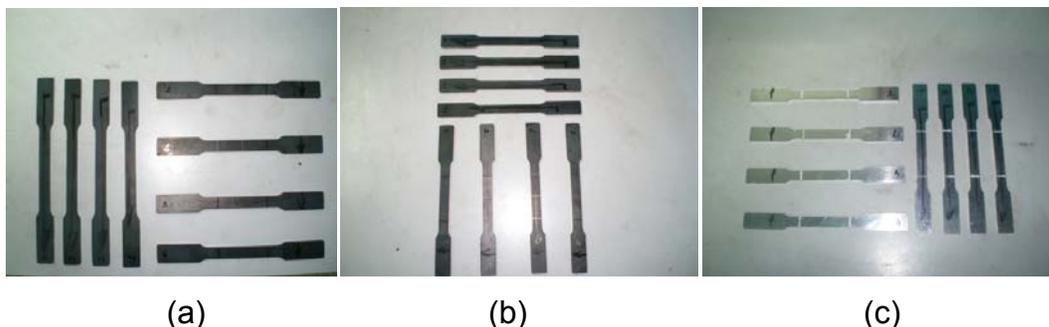


FIGURA 3.2 Probetas utilizadas en el ensayo de tracción (a) Material Acero ASTM A36 (b) Material Acero ASTM A-569 (c) Aluminio 3003 H-14.

3.2.2. ETAPA 2. Realización de ensayos de tracción

Se realizaron ensayos destructivos a treinta y dos (32) probetas, esto incluyendo las condiciones de material, espesor y sentido de laminación. De donde se obtuvieron las gráficas de esfuerzo – deformación, para obtener de éstas las propiedades mecánicas de cada condición necesaria para los ensayos y estudios posteriores.



FIGURA 3.3. Aplicación del ensayo de tracción a probetas

3.2.3. ETAPA 3. Realización de ensayos de doblado en “V”

Se realizaron los ensayos de doblado en “V” utilizando la máquina universal de ensayos (GALDABINI), a la cual se le adaptó la matriz. Además se debieron fabricar dos punzones de distintos radios para simular de manera más detallada las condiciones de doblez a las piezas antes dobladas. Por lo que se efectuaron treinta y dos ensayos incluyendo condiciones de material, espesor y sentido de laminación.



FIGURA 3.4. Herramientales usados en el ensayo de doblado en “V”

3.2.4. ETAPA 4. Evaluación y comparación de la recuperación elástica y la carga de doblado

Luego de obtener las gráficas de los ensayos de tracción y doblado, se obtuvieron las propiedades mecánicas de cada material en sus distintas condiciones, y se procedió a realizar los cálculos teóricos haciendo uso de estos datos.

3.3. Ensayos contemplados

3.3.1. Microscopia Óptica

Éste procedimiento fue necesario en la investigación ya que se debieron determinar características específicas del material. Se ejecuto para verificar las disposiciones de los granos a nivel microscópico, y verificar los sentidos de laminación de cada condición.



FIGURA 3.5 Microscopio Óptico unión, modelo MC – 86267



FIGURA 3.6 Probetas utilizadas para el estudio metalográfico

3.3.2. Ensayos de Dureza

Este ensayo fue aplicado sobre perfiles de doblado extraídos de dos muestras previamente embutidas en el laboratorio. Esto para extraer propiedades de dureza sobre el perfil de doblado y establecer una relación sobre la dureza del material en el doblado de las probetas, a continuación una representación de los sectores en donde se tomaron las muestras de dureza.

Este ensayo se aplicó bajo la Norma ASTM E 384-89 Standard Test Method for Microhardness of Materials.

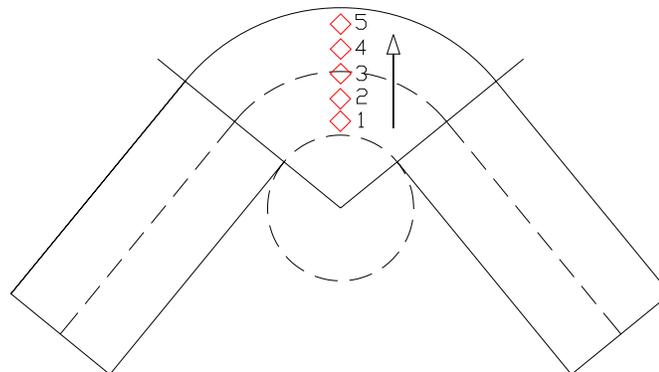


FIGURA 3.7 Representación de perfil de doblado con las muestras de microdureza



FIGURA 3.8 Durómetro perteneciente al laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo

3.3.3. Ensayo de Tracción

Los ensayos de tracción se llevaron a cabo en la máquina universal de ensayos marca Galdabini modelo CTM20 (véase figura 3.9), de 20 toneladas de capacidad. Las probetas para el ensayo de tracción se fabricaron según la norma ASTM E-8M (véase figura 3.10), dicho ensayo consistió en someter a una probeta normalizada, a un esfuerzo de tracción creciente hasta que se produce la ruptura de la probeta.

Mediante la aplicación de éste ensayo se obtuvieron valores de esfuerzo máximo de tracción y esfuerzo de fluencia, variables que junto con otros parámetros como el espesor, longitud de la probeta y abertura de la matriz de doblado, permitieron calcular la carga y la recuperación elástica.



FIGURA 3.9 Maquina Galdabini modelo CTM20

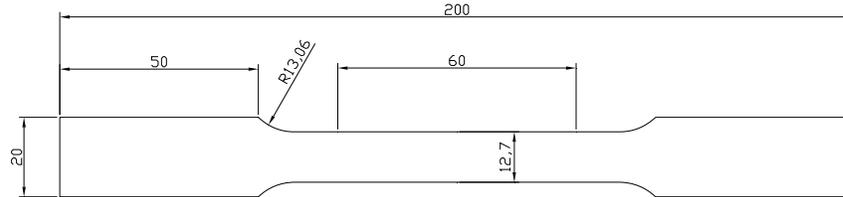


FIGURA 3.10 Probeta para ensayo de tracción de acuerdo a la norma ASTM – E8M.



(a)

(b)

FIGURA 3.11. (a) Probetas Acero ASTM A36 (b) Probetas de aluminio 3003 H-14.
Probetas resultantes del ensayo destructivo de tracción

3.3.4. Ensayo de Doblado

Este proceso consiste básicamente en la colocación de una probeta normalizada sobre la matriz, en espera de que el punzón haga contacto con ésta, hasta acuñarla contra el fondo de la matriz. Luego de que el punzón deja de transmitir la fuerza a la probeta, ésta tiende a volver a su estado inicial, adquiriendo un ángulo interno mayor al del doblado inicial. Esta diferencia es el valor que indica la recuperación elástica que es obtenida por medio de este ensayo.

Se realizó para los diferentes tipos de materiales, usando una matriz en “V” con ángulo recto y para distintos sentidos de laminación, donde se ejecutó cierto número de repeticiones, emitiendo un promedio de dichas repeticiones. Se utilizaron un total de treinta y dos (32) probetas.

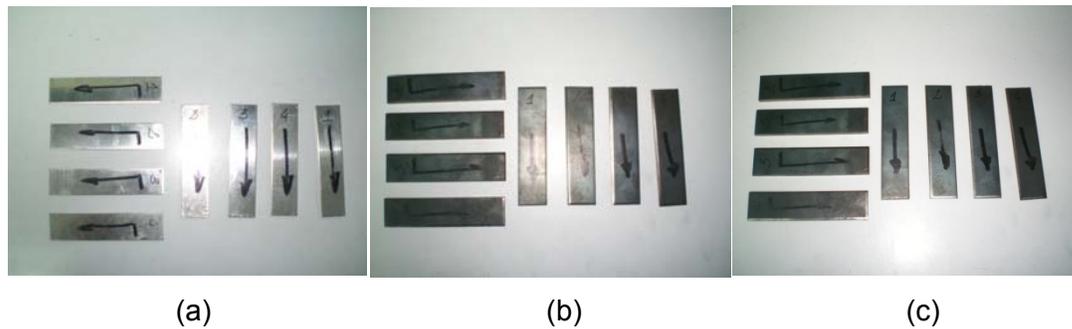


FIGURA 3.12. (a) Probetas Acero ASTM A-36 (b) Probetas Acero ASTM A-569 (c) Probeta de aluminio 3003 H-14. Probetas usadas para el ensayo de doblado en “V”

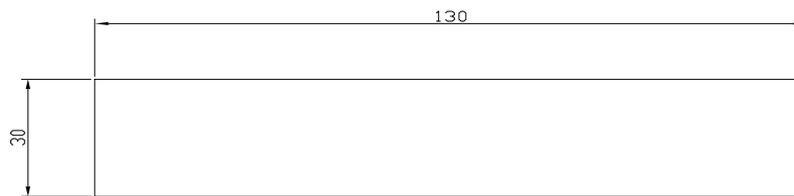


FIGURA 3.13 Dimensiones de la probeta de doblado



FIGURA 3.14 Probetas después del Ensayo de Doblado. (a) Acero ASTM A-36 (b) Aluminio 3003 H-14 3mm

3.4. Población y Muestra

La población fue perteneciente a los materiales utilizados por el departamento de piezas metálicas de la empresa ENCAVA C.A. la muestra se encontró representada por probetas de aluminio 3003 H-14, Acero ASTM A-36 y Acero ASTM A-569, las cuales estuvieron constituidas por sesenta y cuatro (64) probetas en total; de las cuales se usaron treinta y dos (32) para el ensayo de tracción y la misma cantidad para el ensayo de doblado. Usando dieciséis (16) para cada sentido de laminación y según material.

3.5. Técnicas de recolección de datos

Entre las técnicas de recolección de datos que se emplearon se tienen la observación directa en los diferentes ensayos, el análisis documental proveniente de la bibliografía recopilada y las imágenes obtenidas mediante el uso del microscopio óptico (véase figura 3.6).

Entre los instrumentos utilizados, se pueden mencionar: Fotografías, cuadros y tablas diseñadas previamente donde se agruparon los datos obtenidos que luego fueron registrados y tabulados para su análisis. Se realizaron gráficas experimentales que luego fueron sometidas a ciertos análisis comparativos.

3.6. Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos

A los datos recolectados se le aplicó análisis teórico mediante ecuaciones y condiciones que permitieron obtener valores, para compararlos con parámetros establecidos. De manera similar se aplicaron análisis comparativo de los resultados obtenidos mediante los ensayos de doblez para

las condiciones presentadas en las probetas adquiridas, con el fin de identificar si los resultados tuvieron relación alguna.

3.7. Materiales y equipos

- Equipo Universal de ensayo de materiales GALDABINI
- Matriz macho y hembra para el ensayo de doblado en “V”
- Cámara digital
- Porta Punzón
- Banco de Pulido
- Cámara de reactivos químicos



Figura 3.15. Banco de pulido usado para análisis metalográfico.

3.8. Esquema de la Cantidad de Probetas usadas

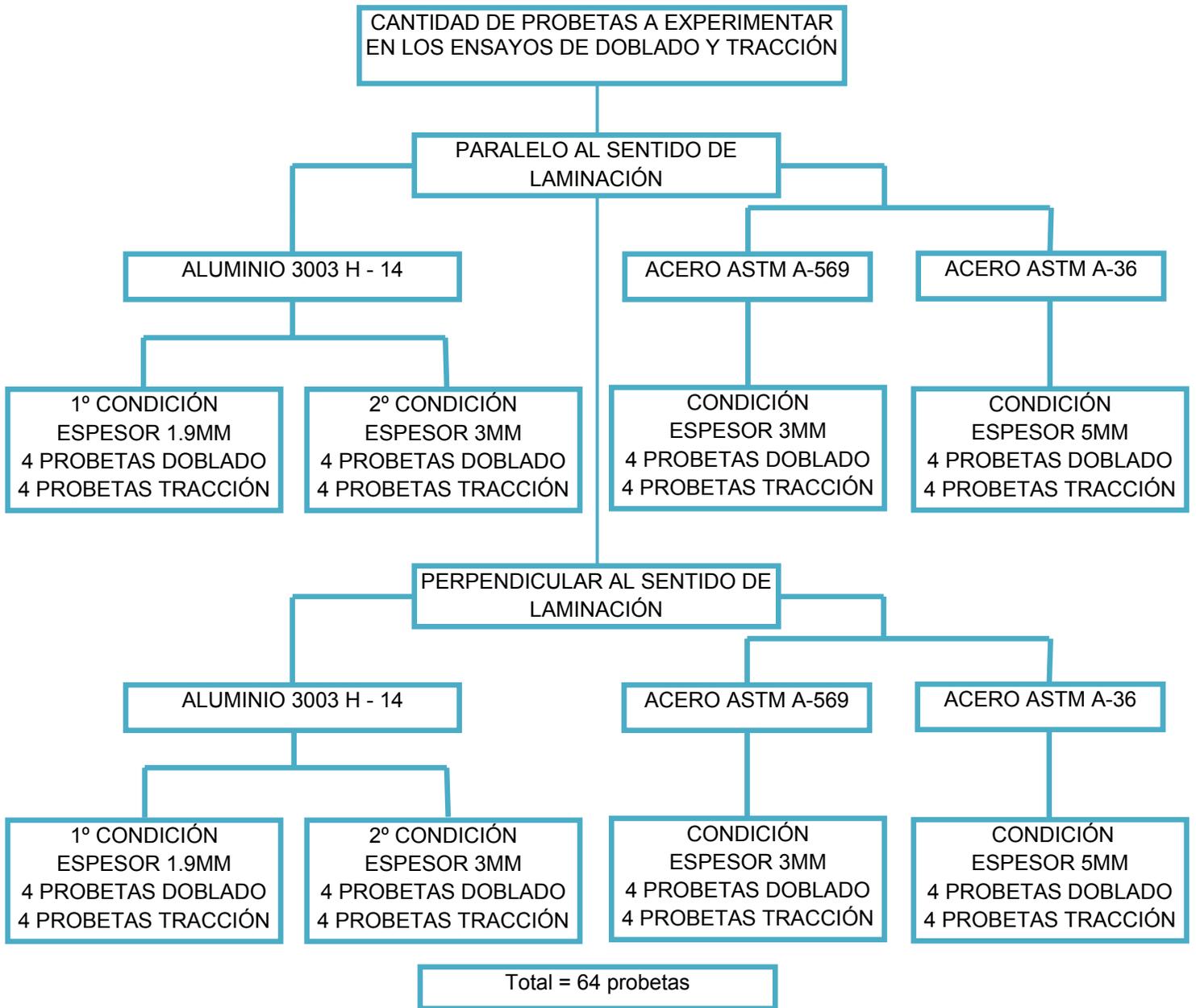


Figura 3.16. Esquema de las probetas utilizadas para los ensayos de tracción y doblado

3.9. Flujo grama del Diseño Experimental

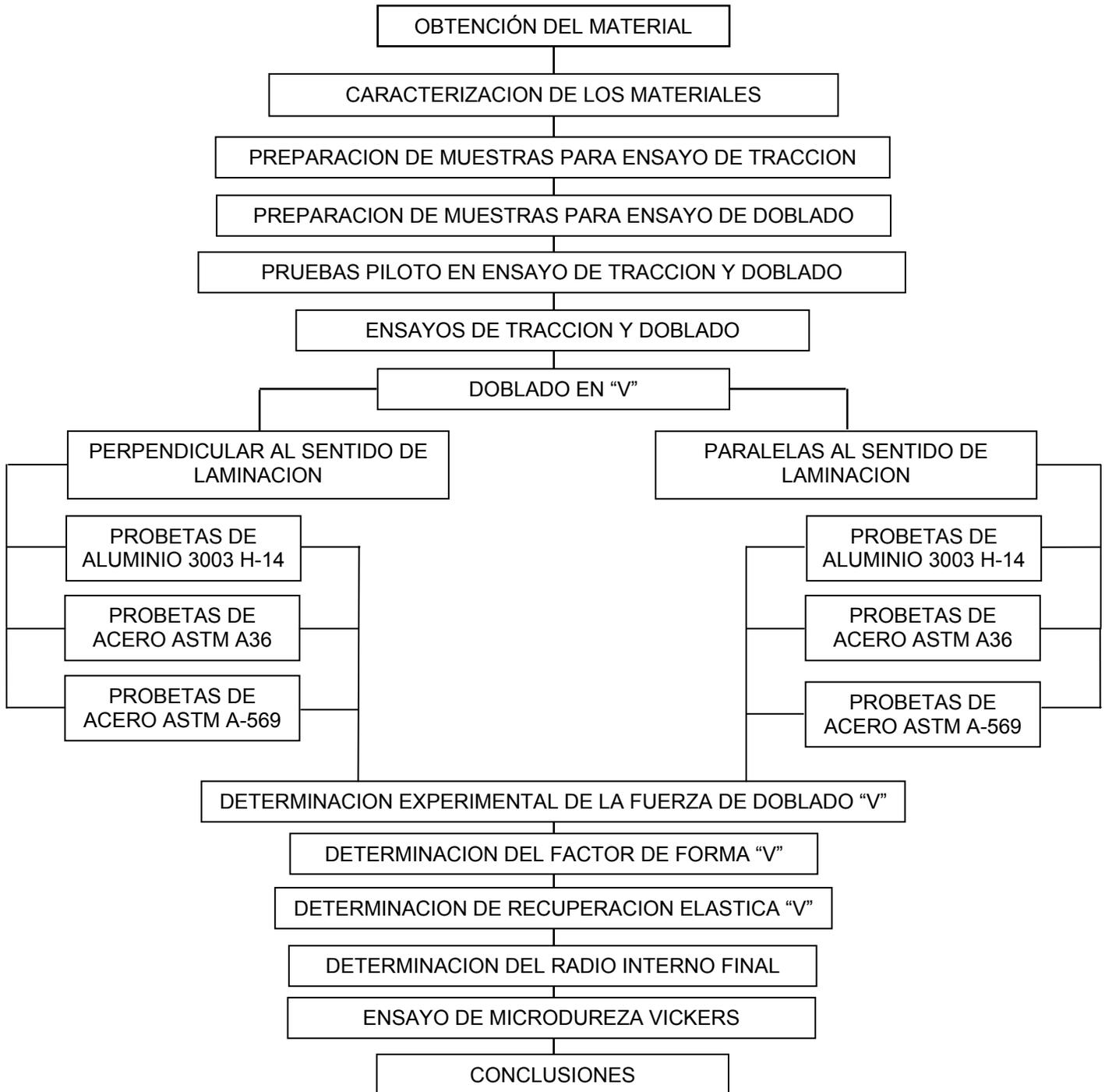


Figura 3.17. Esquema del plan de trabajo para la determinación de la recuperación elástica en función del sentido de laminación para los materiales.

CAPÍTULO 4

Resultados y Análisis de Resultados

4.1. Introducción

En éste capítulo se presentan los resultados y cálculos obtenidos a partir de los ensayos realizados, siguiendo la metodología de trabajo planteada en el capítulo anterior, y por último se presentan los análisis de resultados correspondientes.

4.2. Composición química de los materiales

Las tablas 4.1.1 y 4.1.2 presentan la composición química de los materiales utilizados. Para la validación de los datos se tomaron en cuenta las Normas ASTM B57 (Chemical Properties) para el aluminio 3003 H-14 y la norma ASTM A36, ASTM A-569 para los Aceros.

Tabla 4.1.1. Composición química del aluminio 3003 H-14

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Pb	Cr
0,21	0,63	0,12	1,100	0,006	0,003	0,009	0,001	0,001

Tabla 4.1.2 Composición química del acero ASTM A-36

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al
0,21	0,019	0,48	0,014	0,004	0,004	0,001	0,001	0,047

Tabla 4.1.2 Composición química del acero ASTM A-569

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	V
0,10	0,062	0,53	0,013	0,001	0,005	0,001	0,001	0,050	0,001

4.3. Microscopia realizada a las probetas

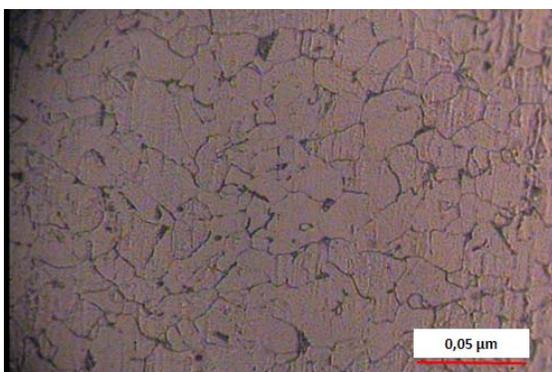


Figura 4.1.a. Microscopia Óptica en Acero ASTM A-569 400X (Paralelo al sentido de laminación).

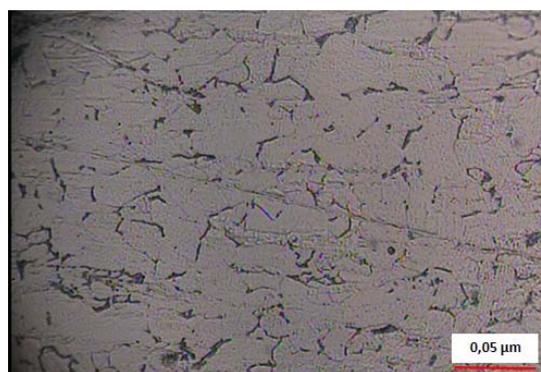


Figura 4.1.b. Microscopia Óptica en Acero ASTM A-569 400X (Perpendicular al sentido de laminación).

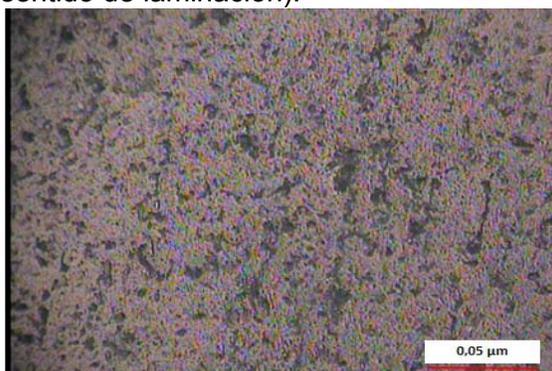


Figura 4.1.c. Microscopia Óptica en Aluminio 3003 H14 con 400X (Paralelo al sentido de laminación).

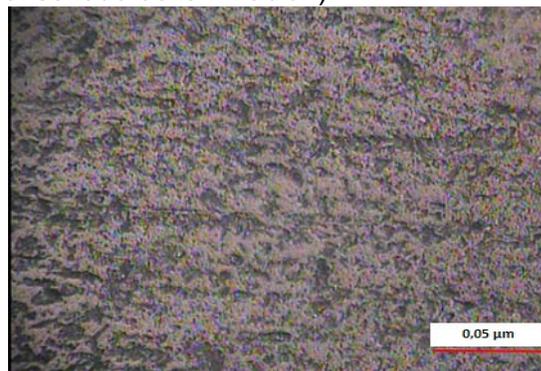


Figura 4.1.d. Microscopia Óptica en Aluminio 3003 H14 con 400X (Perpendicular al sentido de laminación).

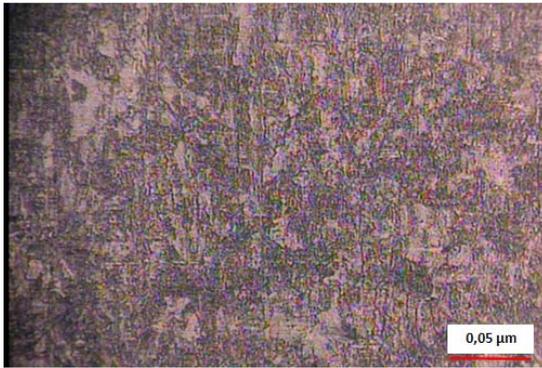


Figura 4.1.e. Microscopia Óptica en Acero ASTM A-36 400X (Paralelo al sentido de laminación).

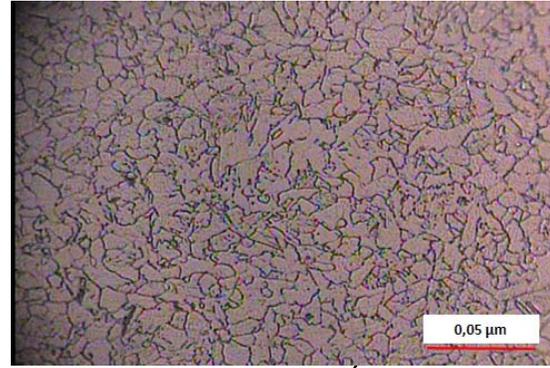


Figura 4.1.f. Microscopia Óptica en Acero ASTM A-36 400X (Perpendicular al sentido de laminación).

4.4. Ensayos de Tracción

A continuación se presentan las gráficas de los esfuerzos vs deformaciones, más representativas de las probetas ensayadas, donde se pueden obtener las propiedades mecánicas, tales como: esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo y deformación. Estas probetas están estandarizadas según norma para la realización del respectivo ensayo. Para estas pruebas se usó la máquina de ensayo universal GALDABINI del laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo. En donde se trabajó con una velocidad de 8 mm/min y una fuerza de 10000 N.

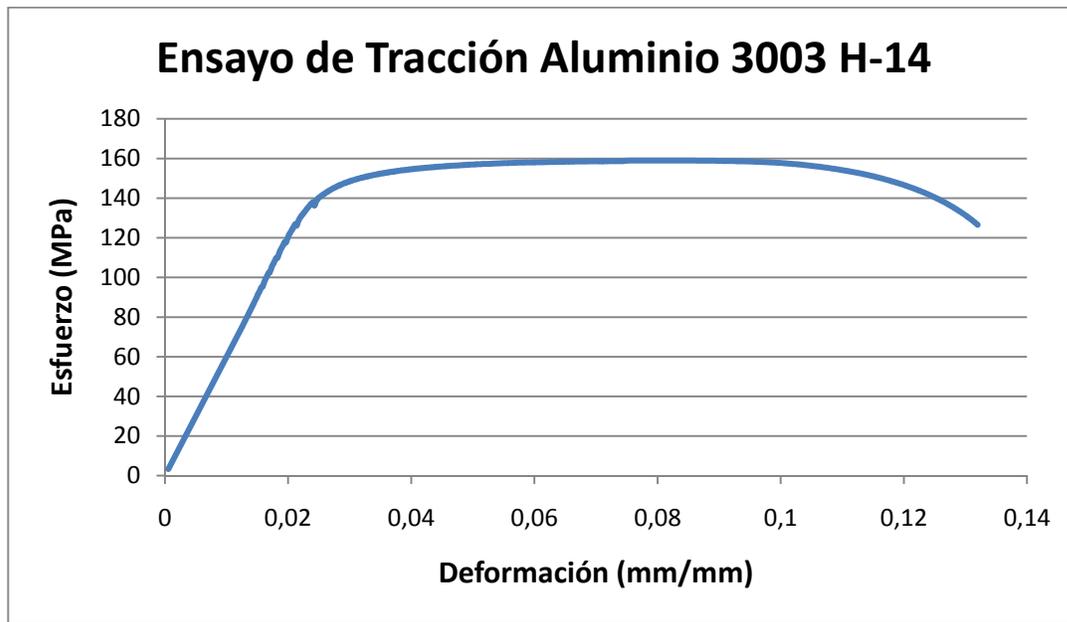


Figura 4.2. Gráfica esfuerzo- deformación material aluminio 3003 H-14 espesor 3mm y paralelo al sentido de laminación.

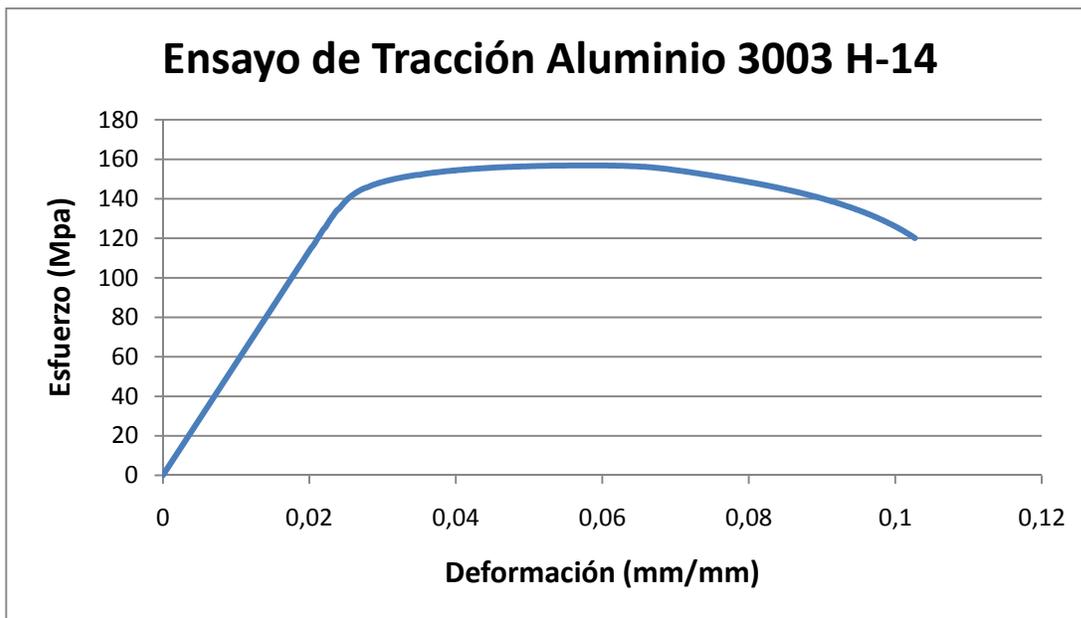


Figura 4.3. Gráfica esfuerzo- deformación material aluminio 3003 H-14 espesor 3mm y perpendicular al sentido de laminación.

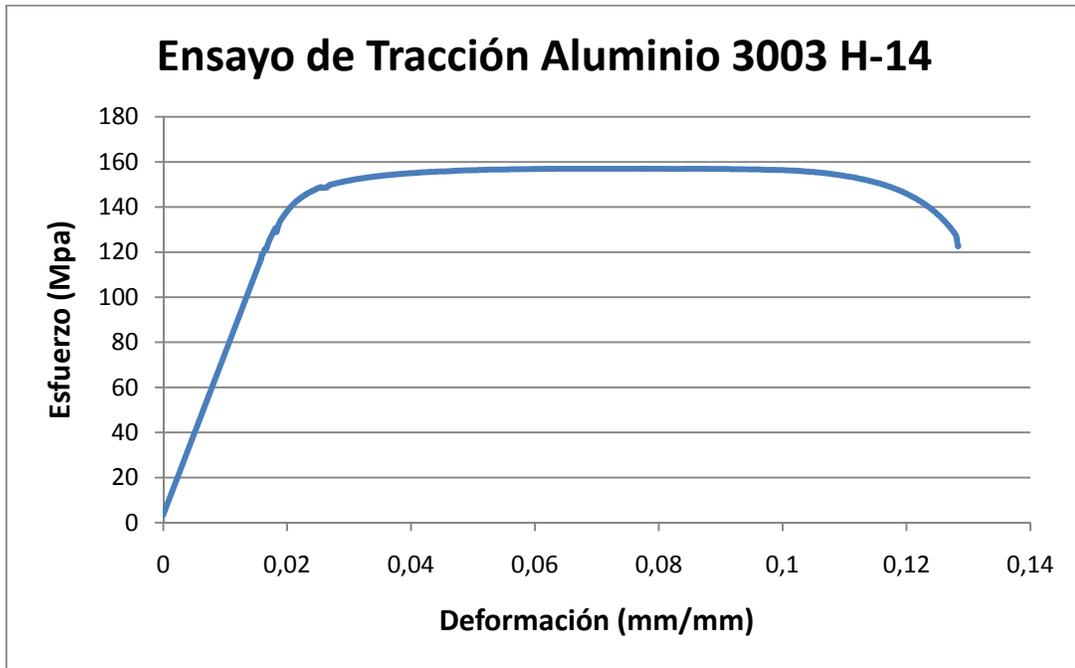


Figura 4.4. Gráfica esfuerzo- deformación material aluminio 3003 H-14 espesor 1,9mm y paralelo al sentido de laminación.

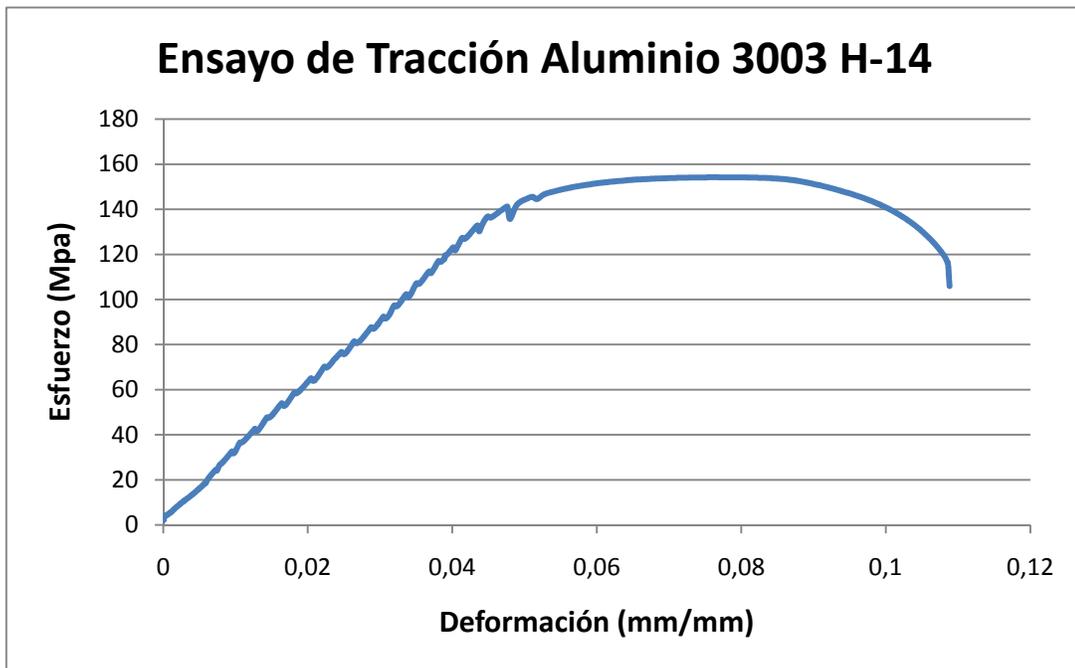


Figura 4.5. Gráfica esfuerzo- deformación material aluminio 3003 H-14 espesor 1,9mm y perpendicular al sentido de laminación.

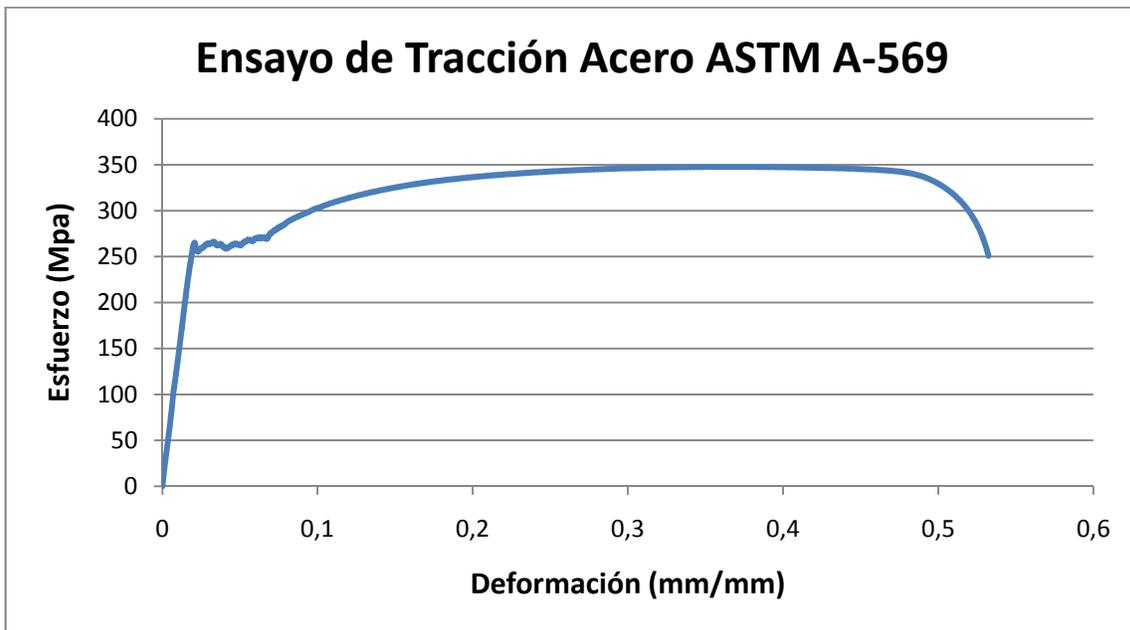


Figura 4.6. Gráfica esfuerzo- deformación material acero ASTM A-569 espesor 3 mm y perpendicular al sentido de laminación.

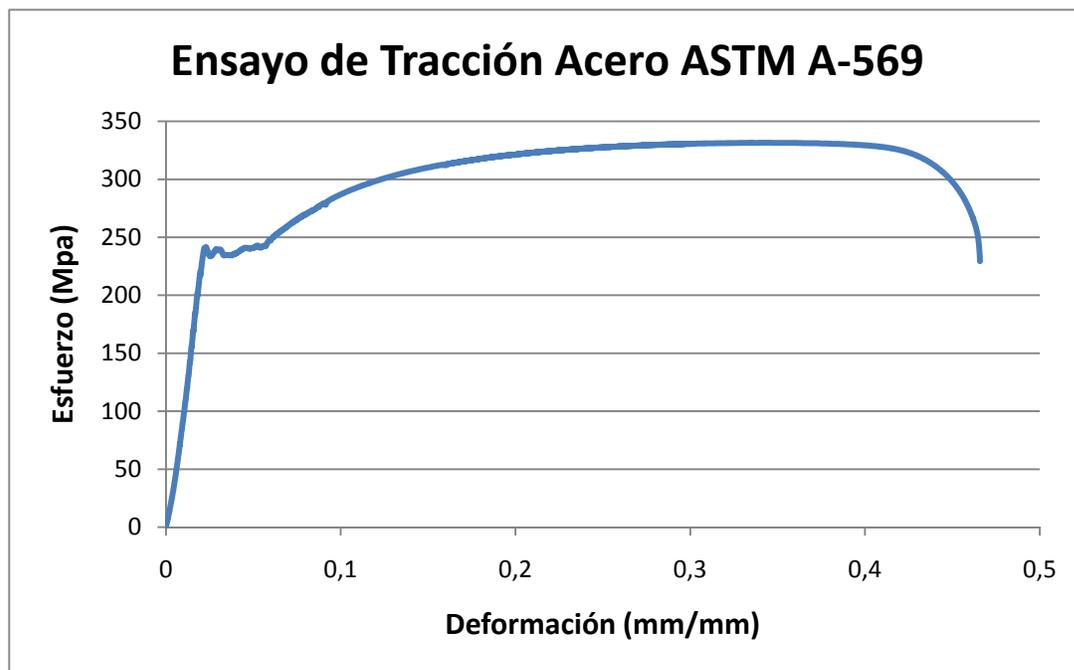


Figura 4.7. Gráfica esfuerzo- deformación material acero ASTM A-569 espesor 3 mm y paralelo al sentido de laminación.

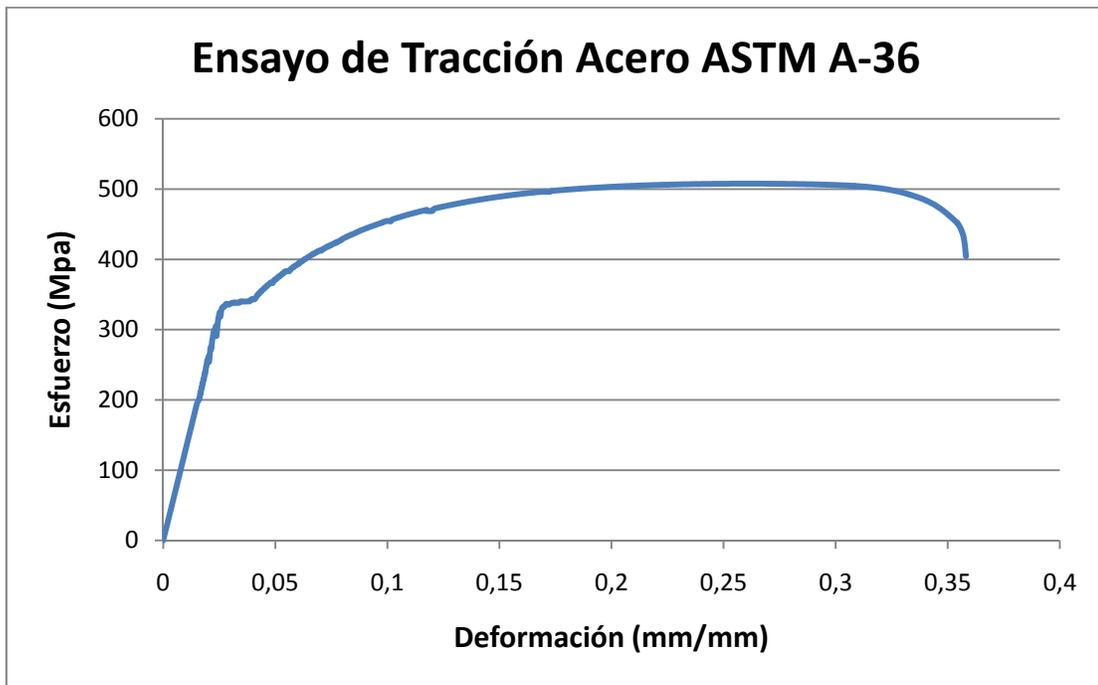


Figura 4.8. Gráfica esfuerzo- deformación material acero ASTM A-36 espesor 5 mm y paralelo al sentido de laminación.

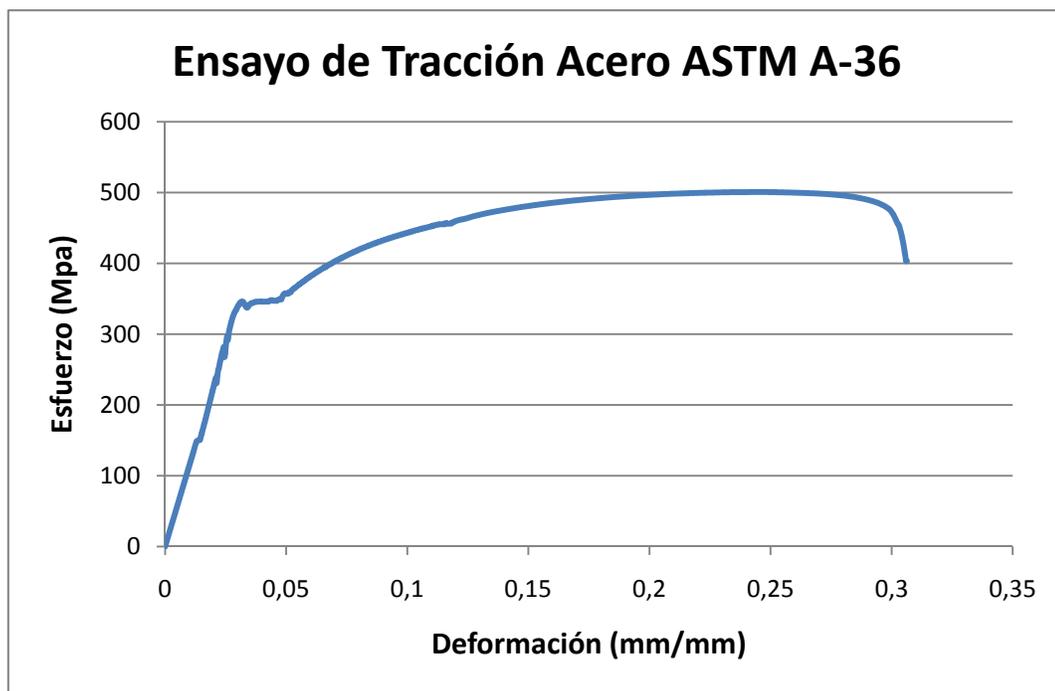


Figura 4.9. Gráfica esfuerzo- deformación material acero ASTM A-36 espesor 5 mm y perpendicular al sentido de laminación.

Luego de realizar las gráficas de esfuerzo vs deformación se procedió a realizar los cálculos de los esfuerzos máximos de tracción (S_{max}) para cada material, espesor y sentido de laminación.

A continuación se muestra un ejemplo de cálculo del esfuerzo máximo de tracción para el material ASTM A-569:

$$A = t \times 12,5 \text{ (mm}^2\text{)} \quad (4.15)$$

$$S_{max} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A} \left(\frac{N}{\text{mm}^2} \right) \quad (4.16)$$

Para un acero ASTM A-569 de espesor de 3 mm y paralelo al sentido de laminación se tiene:

$$A = 3 \times 12,5 = 37,5 \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$S_{max} = \frac{12.850}{37,5} = 342,66 \left(\frac{N}{\text{mm}^2} \right)$$

Para un acero ASTM A-36 de espesor de 5 mm y paralelo al sentido de laminación se tiene:

$$A = 5 \times 12,5 = 62,5 \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$S_{max} = \frac{31.785}{62,5} = 508,56 \left(\frac{N}{\text{mm}^2} \right)$$

De manera similar se realizaron los cálculos para determinar los esfuerzos en el material Aluminio 3003 H-14 en sus distintos espesores y distintas condiciones de laminación. En las tablas 4.3 y 4.4 se muestran los valores de esfuerzo máximo para los materiales acero ASTM A-569, ASTM A-36 y aluminio 3003 H-14 según espesores y sentido de laminación.

Tabla 4.2 Esfuerzos de tracción en Aluminio 3003 H-14 para distintos espesores y sentido de laminación

Aluminio 3003 H-14				
Sentido de laminación		Espesores (mm)	Esfuerzo máximo de tracción	Smax Promedio
			Smax (N/mm²)	(N/mm²)
Sentido de laminación	Paralelo	3 mm.	161,52	158,07
			155,76	
			155,47	
			159,28	
	Perpendicular		157,60	158,16
			159,33	
			158,32	
			157,39	

Aluminio 3003 H-14				
Sentido de laminación		Espesores (mm)	Esfuerzo máximo de tracción	Smax Promedio
			Smax (N/mm²)	(N/mm²)
Sentido de laminación	Perpendicular	1,9 mm.	159,45	162,79
			165,31	
			161,56	
			164,84	
	Paralelo		158,69	158,36
			156,72	
			152,76	
			165,26	

Tabla 4.3 Esfuerzos de tracción para Acero ASTM A-569 y Acero ASTM A-36

Acero ASTM A-36				
Sentido de laminación	Perpendicular	Espesores (mm)	Esfuerzo máximo de tracción S_{max} (N/mm²)	S_{max} Promedio (N/mm²)
		5 mm.	Perpendicular	
	508,56			
	499,18			
	508,50			
Paralelo			515,79	488,77
			515,71	
			461,26	
			462,32	
Acero ASTM A-569				
Sentido de laminación	Paralelo	Espesores (mm)	Esfuerzo máximo de tracción S_{max} (N/mm²)	S_{max} Promedio (N/mm²)
		3 mm.	Paralelo	
	335,09			
	336,83			
	331,25			
Perpend			347,89	348,69
			347,68	
			346,03	
			353,17	

Se determina el esfuerzo de fluencia S_y (N/mm²) de cada material y para cada espesor. Para obtener el esfuerzo de fluencia al 0,2% se determina a partir del diagrama de esfuerzo vs deformación, en el cual se dibuja una línea paralela en la zona elástica (lineal) de la gráfica esfuerzo vs deformación a una deformación 0,002 (mm/mm), y es en el punto donde ocurre la intercepción con la curva se encuentra el valor de esfuerzo a 0,2%.

De manera similar se realizan los cálculos para los demás espesores, material y sentido de laminación. En las tablas 4.5 se muestran los esfuerzos de fluencia al 0,2% obtenidos para los aceros ASTM A-36, ASTM A-569 y aluminio 3003 H-14.

Tabla 4.4 Esfuerzos de fluencia y deformación unitaria Aluminio 3003 H-14 para distintos espesores y sentido de laminación

Aluminio 3003 H-14				
Sentido de laminación		Espesores (mm)	Esfuerzo de fluencia Sy (N/mm²)	Sy Promedio (N/mm²)
	Paralelo	Paralelo	3 mm.	148,24
143,67				
144,77				
147,21				
Perpendicular		151,33		150,24
		151,49		
		149,5		
		148,63		

Aluminio 3003 H-14				
Sentido de laminación		Espesores (mm)	Esfuerzo de fluencia Sy (N/mm²)	Sy Promedio (N/mm²)
	Perpend	Perpend	1,9 mm.	145,91
148,32				
146,78				
155,94				
Paralelo		147,69		148,6075
		146,99		
		146,87		
		152,88		

Tabla 4.5 Esfuerzos de fluencia y deformación unitaria Acero ASTM A-569 y ASTM A-36

Acero ASTM A-36				
Sentido de laminación	Perpendicular	Espesores (mm)	Esfuerzo de fluencia Sy (N/mm ²)	Sy Promedio (N/mm ²)
		5 mm.	Perpendicular	
	326,11			
	326			
	318			
Paralelo			336,47	301,15
			335,13	
			267	
			266	
Acero ASTM A-569				
Sentido de laminación	Paralelo	Espesores (mm)	Esfuerzo de fluencia Sy (N/mm ²)	Sy Promedio (N/mm ²)
		3 mm.	Paralelo	243
242,83				
237,27				
242,38				
Perpend	248,71		252,06	
	250,6			
	253,12			
	255,8			

Consiguientemente se realizó el cálculo del modulo de elasticidad y se presentan los valores de esfuerzos de tracción y esfuerzos de fluencia obtenidos para cada material. A continuación se muestra un ejemplo de cálculo de modulo de elasticidad para el material ASTM A-36 de espesor 5 mm (paralelo al sentido de laminación).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \text{ (MPa)} \quad (4.17)$$

Donde:

σ : Esfuerzo de tracción (N/mm²)

ε : Deformación (mm/mm)

$$E = \frac{300,72 - 250,34}{0,0298 - 0,0260} = 13257 \text{ (MPa)}$$

De manera similar se realizaron los cálculos para el material aluminio 3003 H-14 y los demás espesores tomando en consideración los sentidos de laminación.

Tabla 4.6 Módulos de elasticidad en Aluminio 3003 H-14 para distintos espesores y sentido de laminación

Aluminio 3003 H-14							
Sentido de laminación	Paralelo	Espesores (mm)	Modulo de Elasticidad E (N/mm ²)	E Promedio (N/mm ²)	Espesores (mm)	Modulo de Elasticidad E (N/mm ²)	E Promedio (N/mm ²)
			Perpend	3 mm.		5993	5999
5881							
6360							
5762							
5664	5900	5900		4672	4682		
5683							
5880							
6375							

Tabla 4.7 Módulos de elasticidad en Aceros ASTM A-569 y ASTM A-36 distintos sentido de laminación

Acero ASTM A-36 y Acero ASTM A-569							
Sentido de laminación	Paralelo	Espesores (mm)	Modulo de Elasticidad E (N/mm ²)	E Promedio (N/mm ²)	Espesores (mm)	Modulo de Elasticidad E (N/mm ²)	E Promedio (N/mm ²)
			Perpend	5 mm.		13257	12638
13256							
12602							
11438							
12912	12429	12429		14204	13974		
14230							
11682							
10893							

4.5. Ensayos de Doblado

A continuación se presentan las gráficas (4.10 a 4.18) obtenidas en los ensayos de doblado para los diferentes materiales, espesores y sentido de laminación en donde se pueden apreciar las fuerzas máximas de doblado.

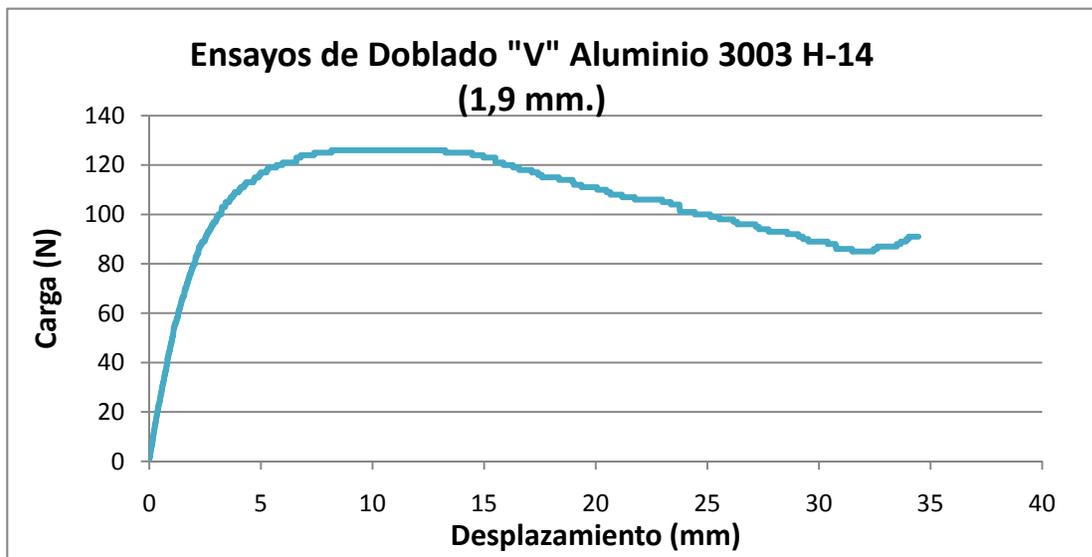


Figura 4.10. Doblado en "V". Aluminio 3003 H-14 (1,9 mm) Perpendicular al sentido de laminación.

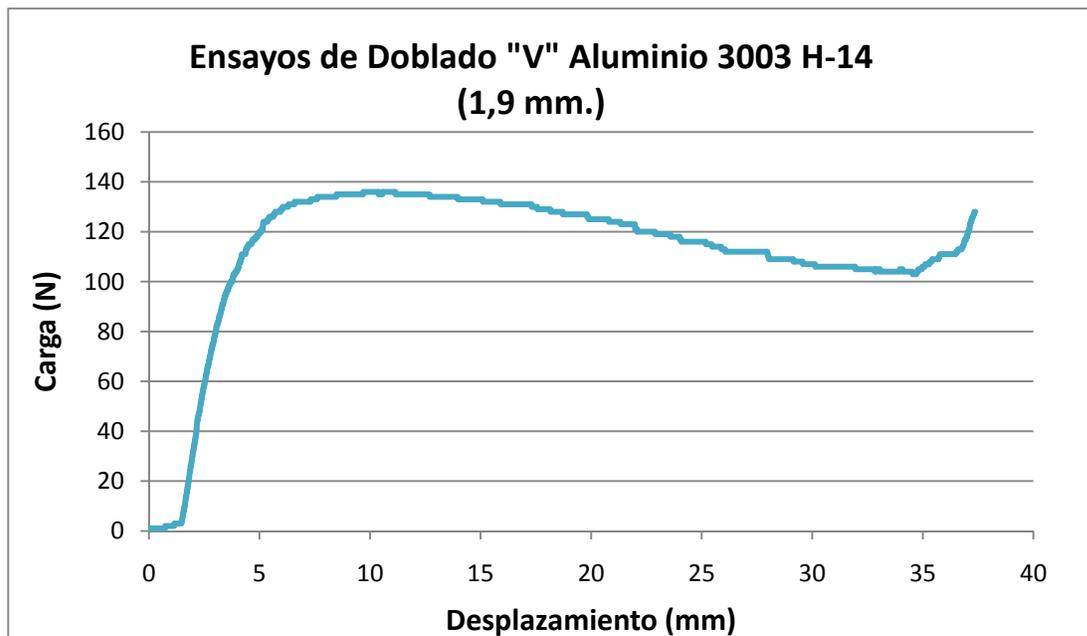


Figura 4.11. Doblado en "V". Aluminio 3003 H-14 (1,9 mm) Paralelo al sentido de laminación.

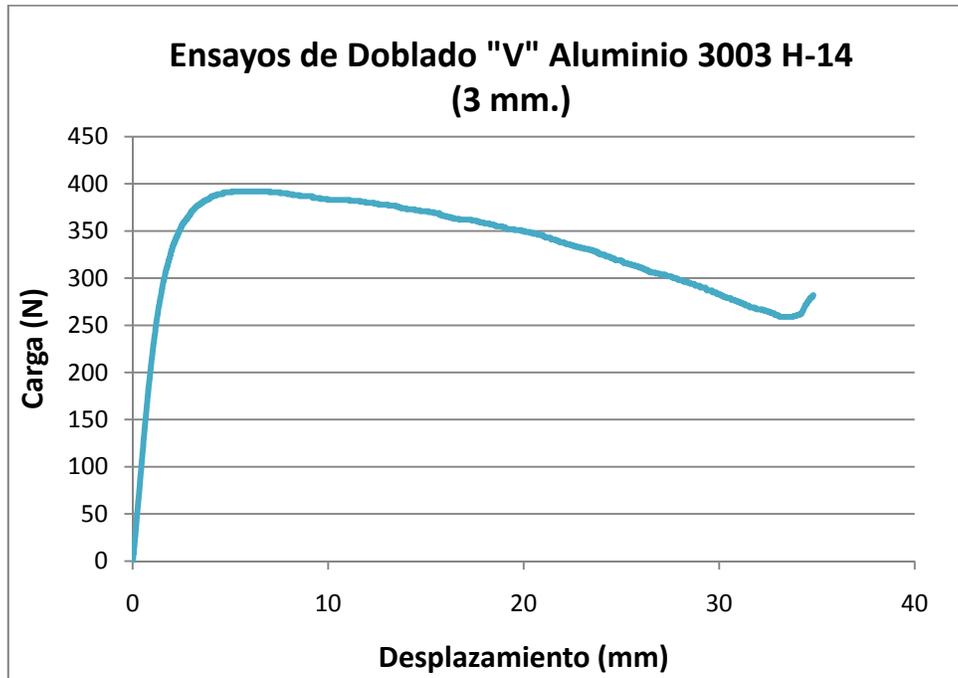


Figura 4.12. Doblado en "V". Aluminio 3003 H-14 (3 mm) Perpendicular al sentido de laminación.

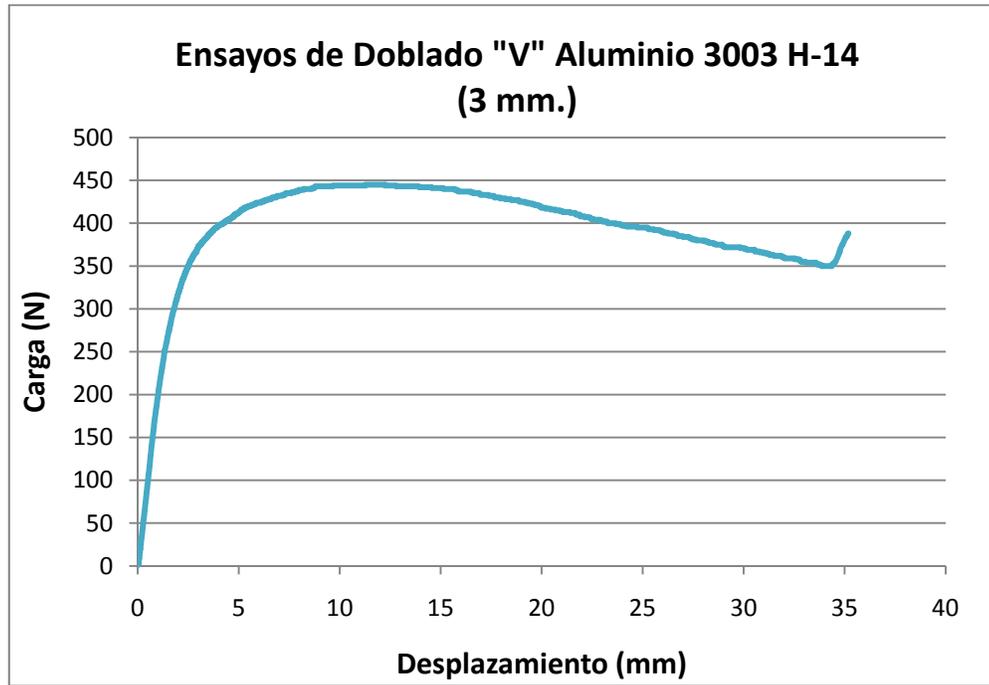


Figura 4.13. Doblado en "V". Aluminio 3003 H-14 (3 mm) Paralelo al sentido de laminación.

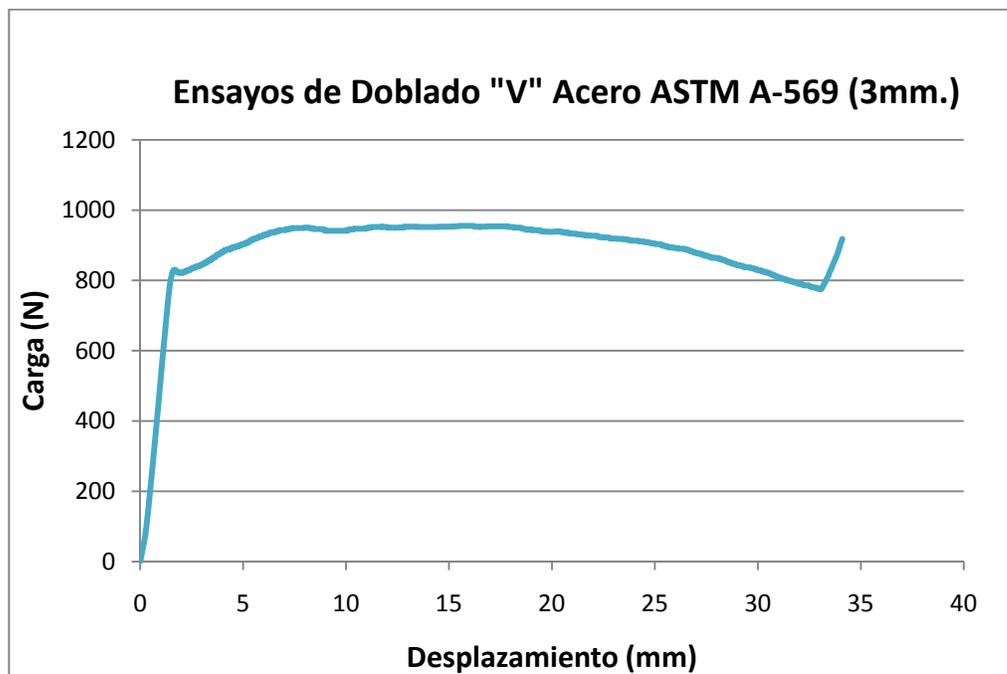


Figura 4.14. Doblado en "V". Acero ASTM A-569 (3mm) Perpendicular al sentido de laminación.

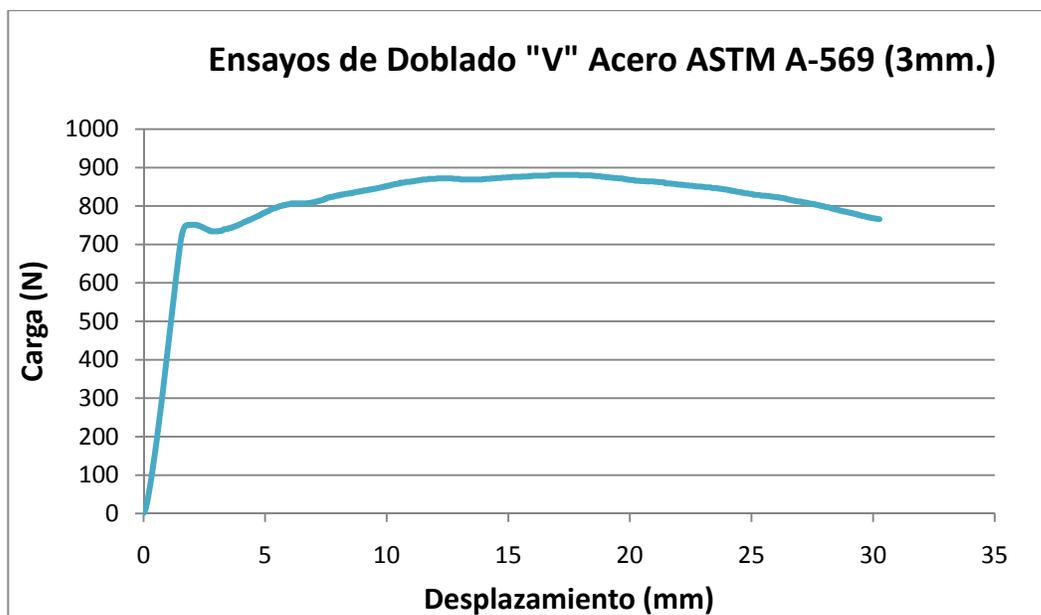


Figura 4.15. Doblado en "V". Acero ASTM A-569 (3mm) Paralelo al sentido de laminación.

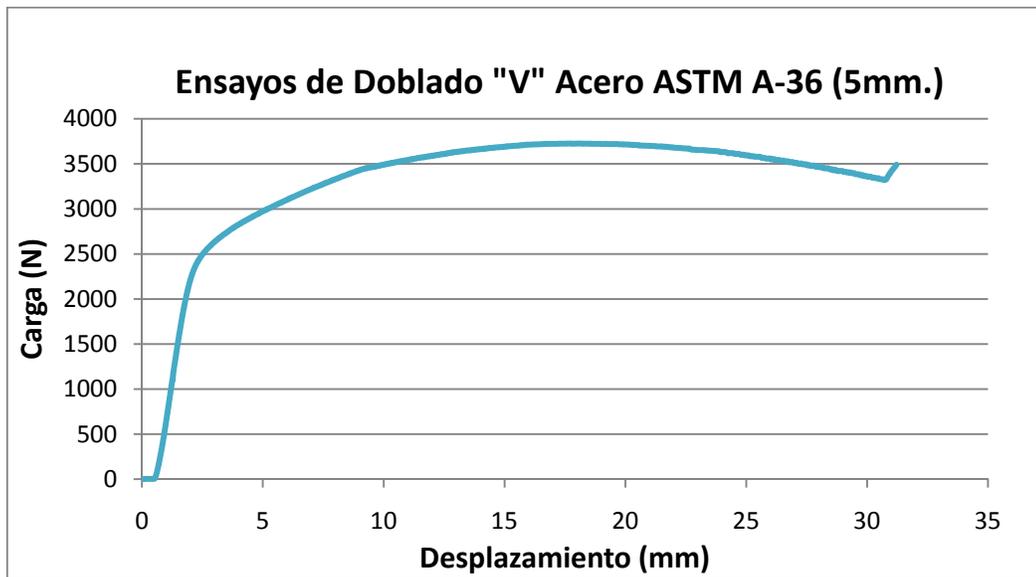


Figura 4.16. Doblado en "V". Acero ASTM A-36 (5mm) Perpendicular al sentido de laminación.

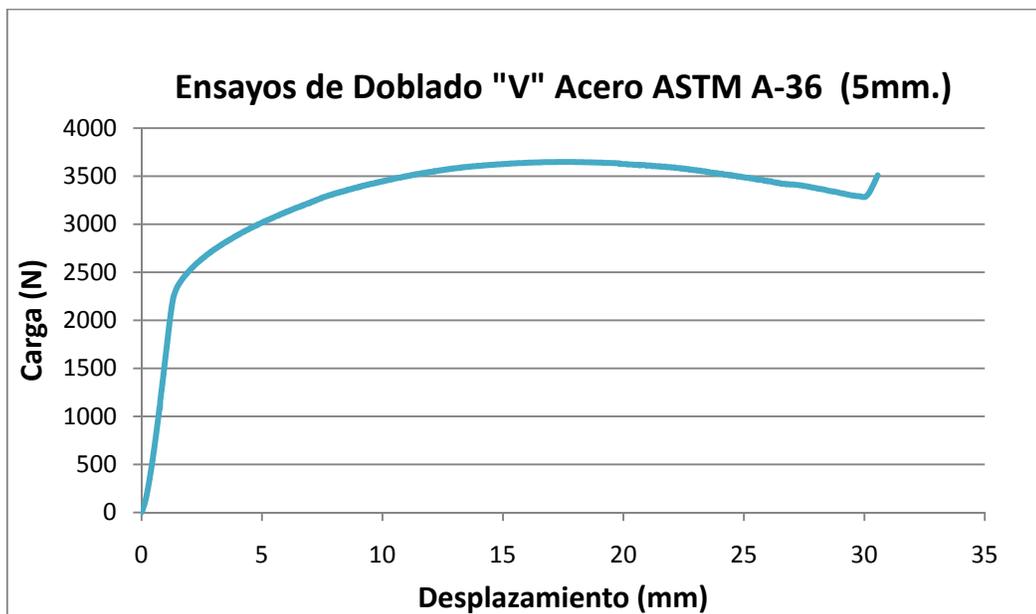


Figura 4.17. Doblado en "V". Acero ASTM A-36 (5mm) Paralelo al sentido de laminación.

4.6. Resultados de la carga experimental en el doblado en “V”

En las tablas 4.9 y 4.10 se muestran valores de carga experimentales para cada material y espesor según sentido de laminación.

Tabla 4.8 Resultados de las cargas experimentales obtenidas en el doblado de Aceros

Aceros ASTM A-569 (3mm) y ASTM A-36 (5mm)							
Sentido de laminación	Paralelo	Espesores (mm)	Carga Experimental (N)	Carga Promedio (N)	Espesores (mm)	Carga Experimental (N)	Carga Promedio (N)
			Perpend	3 mm.		796	797,5
812	3777						
793	3563						
789	3381						
5 mm.	992	907,5		4024	3799		
	881			3725			
	874			3880			
	883			3567			

Tabla 4.9 Resultados de las cargas experimentales obtenidas en el doblado en Aluminio 3003H-14

Aluminio 3003 H-14							
Sentido de laminación	Perpendicular	Espesores (mm)	Carga Experimental (N)	Carga Promedio (N)	Espesores (mm)	Carga Experimental (N)	Carga Promedio (N)
			Paralelo	1,9 mm.		136	133,5
135	382						
123	397						
140	465						
3 mm.	139	124,75		392	388,25		
	126			356			
	108			326			
	126			479			

4.7. Ensayo de Microdureza Vickers

En las tablas 4.12.A hasta las tablas 4.12.H se muestran los valores de microdureza Vickers que fueron obtenidos en los ensayos aplicados a una carga de 50g y 100g en perfiles de doblado, a muestras de aluminio 3003 H-14 y aceros respectivamente con espesores de (acero ASTM A-36 5mm, ASTM A-569 3mm y aluminio 1.9mm, 3 mm) en cinco puntos diferentes del perfil de doblado como se representa en la figura 4.18.

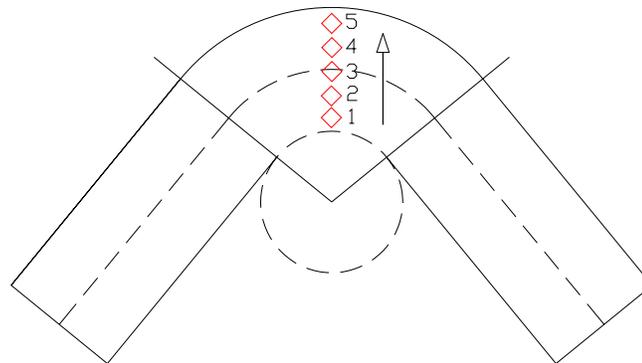


Figura 4.18. Representación del perfil de ensayo de microdureza Vickers.

4.7.1. Ensayo de Microdureza Vickers para Aluminio 3003 H-14

Tabla 4.10.A. Valores de dureza para aluminio con espesor 1.9 mm (Paralelo Sentido Laminación)

Punto de Ensayo	1	2	3	4	5
HV	52.6	50.9	51.9	51.2	51.9
PROMEDIO	51.7				

Tabla 4.10.B. Valores de dureza para aluminio con espesor 3 mm (Paralelo Sentido de laminación)

Punto de Ensayo	1	2	3	4	5
HV	54.8	54.5	49.5	46.6	45.7
PROMEDIO	50.22				

Tabla 4.10.C. Valores de dureza para aluminio con espesor 1.9 mm (Perpendicular Sentido Laminación)

Punto de Ensayo	1	2	3	4	5
HV	50.6	51.3	51.6	48.8	43.4
PROMEDIO	49.14				

Tabla 4.10.D. Valores de dureza para aluminio con espesor 3 mm (Perpendicular Sentido Laminación)

Punto de Ensayo	1	2	3	4	5
HV	45.4	44.7	44.7	48.3	47.9
PROMEDIO	46.2				

4.7.2. Ensayo de Microdureza Vickers para Acero ASTM A-36

Tabla 4.10.E. Valores de dureza para Acero ASTM A-36 con espesor 5 mm (Paralelo sentido laminación).

Punto de Ensayo	1	2	3	4	5
HV	194,2	189,3	190,5	197,4	183,4
PROMEDIO	190,96				

Tabla 4.10.F. Valores de dureza para Acero ASTM A-36 con espesor 5 mm (Perpendicular sentido laminación)

Punto de Ensayo	1	2	3	4	5
HV	213,1	193	165,2	148,8	148
PROMEDIO	173,62				

4.7.3. Ensayo de Microdureza Vickers para Acero ASTM A-569

Tabla 4.10.G. Valores de dureza para Acero ASTM A-569 con espesor 3 mm (Paralelo sentido laminación).

Punto de Ensayo	1	2	3	4	5
HV	175,6	162,3	151,4	158,5	150,5
PROMEDIO	173,62				

Tabla 4.10.H. Valores de dureza para Acero ASTM A-569 con espesor 3 mm (Perpendicular sentido laminación).

Punto de Ensayo	1	2	3	4	5
HV	102,7	104	104,1	102,7	109,2
PROMEDIO	104,54				

4.8. Cálculo de Factor de Forma para matriz en “V”

A continuación se muestran las fórmulas y tablas en donde se presentan los resultados obtenidos del factor de forma con los diferentes espesores y materiales. Se usó la ecuación 2.5 descrita anteriormente.

Calculo de Factor de forma para la matriz en “V”.

$$F = \frac{k S_{max} L t^2}{W}$$

Y despejando el factor de forma para la matriz en “V” se obtiene.

$$k = \frac{F W}{S_{max} L t^2}$$

Donde:

F: Fuerza de doblado experimental (N)

W: Distancia entre los apoyos (mm.)

S_{max}: Esfuerzo máximo de tracción (MPa)

L: Ancho de la probeta (mm.)

t: Espesor de la probeta (mm.)

k: Factor de forma

Ejemplo de cálculo de Factor de forma en matriz “V” para lámina de aluminio 3003 H-14 de espesor 1,9mm paralelo al sentido de laminación.

$$K = \frac{136 * (70,9)}{162,79 * 30 * 1,9^2} = 0,5622$$

4.8.1. Factor de Forma para Aluminio 3003 H-14 de 1,9 mm de espesor

Tabla 4.11.A Determinación del factor de forma para láminas de Aluminio 3003 H-14 de 1,9 mm de espesor, en matriz de doblado en forma de “V”.

Sentido de laminación		Forma de la matriz	Fuerza de Doblado (N).	Esfuerzo máximo de tracción S_{max} (MPa)	Distancia entre apoyos (mm)	Ancho de la probeta (mm)	Factor de forma
	Perpend	V	136	158,36	70,9	30	0,5622
		V	135	158,36	70,9	30	0,5580
		V	123	158,36	70,9	30	0,5084
		V	140	158,36	70,9	30	0,5787
						Promedio	0,5518
	Paralelo	V	139	162,79	70,9	30	0,5589
		V	126	162,79	70,9	30	0,5067
		V	108	162,79	70,9	30	0,4343
		V	126	162,79	70,9	30	0,5067
					Promedio	0,5016	

4.8.2. Factor de Forma para Aluminio 3003 H-14 de 3 mm de espesor

Tabla 4.11.B Determinación del factor de forma para láminas de Aluminio 3003 H-14 de 3 mm de espesor, en matriz de doblado en forma de “V”.

Sentido de laminación		Forma de la matriz	Fuerza de Doblado (N).	Esfuerzo máximo de tracción S_{max} (MPa)	Distancia entre apoyos (mm)	Ancho de la probeta (mm)	Factor de forma
	Perpend	V	445	158,07	70,9	30	0,7392
		V	382	158,07	70,9	30	0,6345
		V	397	158,07	70,9	30	0,6595
		V	465	158,07	70,9	30	0,7724
						Promedio	0,6989
	Paralelo	V	392	158,16	70,9	30	0,6508
		V	356	158,16	70,9	30	0,5910
		V	326	158,16	70,9	30	0,5412
		V	479	158,16	70,9	30	0,7952
					Promedio	0,6445	

4.8.3. Factor de Forma para Acero ASTM A-569 de 3 mm de espesor

Tabla 4.11.C Determinación del factor de forma para láminas de Acero ASTM A-569 de 3 mm de espesor, en matriz de doblado en forma de “V”.

Sentido de laminación		Forma de la matriz	Fuerza de Doblado (N).	Esfuerzo máximo de tracción S_{max} (MPa)	Distancia entre apoyos (mm)	Ancho de la probeta (mm)	Factor de forma
	Paralelo	V	796	336,46	70,9	30	0,6212
		V	812	336,46	70,9	30	0,6337
		V	793	336,46	70,9	30	0,6189
		V	789	336,46	70,9	30	0,6157
						Promedio	0,6223
	Perpend	V	992	348,69	70,9	30	0,7470
		V	881	348,69	70,9	30	0,6634
		V	874	348,69	70,9	30	0,6581
		V	883	348,69	70,9	30	0,6643
					Promedio	0,6832	

4.8.4. Factor de Forma para Acero ASTM A-36 de 5 mm de espesor

Tabla 4.11.D Determinación del factor de forma para láminas de Acero ASTM A-36 de 5 mm de espesor, en matriz de doblado en forma de “V”.

Sentido de laminación		Forma de la matriz	Fuerza de Doblado (N).	Esfuerzo máximo de tracción S_{max} (MPa)	Distancia entre apoyos (mm)	Ancho de la probeta (mm)	Factor de forma
	Paralelo	V	3648	488,77	70,9	30	0,7055
		V	3777	488,77	70,9	30	0,7305
		V	3563	488,77	70,9	30	0,6891
		V	3381	488,77	70,9	30	0,6539
						Promedio	0,6947
	Perpend	V	4024	506,26	70,9	30	0,7513
		V	3725	506,26	70,9	30	0,6955
		V	3880	506,26	70,9	30	0,7245
		V	3567	506,26	70,9	30	0,6660
					Promedio	0,7078	

4.9. Angulo Final de doblado en “V”

En las tablas 4.14 y 4.15 se muestran los ángulos finales de las piezas después del doblado en “V” para cada material y distintos espesores.

Tabla 4.12 Ángulo final de la pieza doblada después del doblado en “V” para los aceros ASTM A-569 y ASTM A-36 respectivamente.

Acero ASTM A-569					
Sentido de laminación		Espesores (mm)	Angulo de la matriz β_i (°)	Angulo final de la pieza doblada β_f (°)	Angulo Final promedio β_{fprom} (°)
		Paralelo	3	90	74
90				75	
90				76	
90				77	
Perpend		90		78	78
		90		78	
		90		78	
		90		78	
Acero ASTM A-36					
Sentido de laminación		Espesores (mm)	Angulo de la matriz β_i (°)	Angulo final de la pieza doblada β_f (°)	Angulo Final promedio β_{fprom} (°)
		Paralelo	5	90	72
90				72	
90				73	
90				73	
Perpend		90		73	72
		90		71	
		90		71	
		90		73	

Tabla 4.13 Ángulo final de la pieza doblada después del doblado en “V” para un aluminio 3003 H-14

Aluminio 3003 H-14					
Sentido de laminación		Espesores (mm)	Angulo de la matriz β_i (°)	Angulo final de la pieza doblada β_f (°)	Angulo Final promedio β_{fprom} (°)
	Paralelo	1,9	90	69	69
			90	70	
			90	69	
			90	68	
	Perpend	1,9	90	72	72
			90	72	
			90	72	
90			72		
sentido de laminación		Espesores (mm)	Angulo de la matriz β_i (°)	Angulo final de la pieza doblada β_f (°)	Angulo Final promedio β_{fprom} (°)
	Paralelo	3	90	77	73,75
			90	73	
			90	73	
			90	72	
	Perpend	3	90	73	73,5
			90	73	
			90	75	
90			73		

4.10. Cálculo del Factor de recuperación “Kr” y el ángulo de recuperación elástica “Δβ”

En el capítulo II se definió como un posible parámetro para cuantificar la recuperación, el factor Kr como coeficiente entre los ángulos de doblado.

Un valor Kr igual a la unidad indicará la ausencia de recuperación, mientras que un valor igual a cero indicará una recuperación elástica completa.

El factor “Kr” viene definido por la ecuación (2.13) y “Δβ” viene definido por la ecuación (2.10):

$$K_r = \frac{\beta_f}{\beta_i}$$

$$\Delta\beta = \left(\frac{1}{K_r} - 1\right)\beta_f$$

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo para el material Acero ASTM A-569 de 3 mm espesor y paralelo al sentido de laminación:

$$K_r = \frac{74^\circ}{90^\circ} = 0,82$$

$$\Delta\beta = \left(\frac{1}{0,82} - 1\right)74^\circ = 16^\circ$$

$$\Delta\beta = 16^\circ$$

De manera similar se realizan con los demás espesores y el otro material, en las tablas a continuación se presentan los valores de “Kr” y “Δβ”:

Tabla 4.14 Valores de Kr y $\Delta\beta$ para doblado en “V” para el material ASTM A-569

Acero ASTM A-569						
Sentido de Laminación		Espesores (mm)	Kr	$\Delta\beta(^{\circ})$	Kr Promedio	$\Delta\beta$ Promedio ($^{\circ}$)
0,83	15,36					
0,84	14,47					
0,85	13,58					
Perpend	3	0,87	11,65	0,87	11,65	
		0,87	11,65			
		0,87	11,65			
		0,87	11,65			

Tabla 4.15 Valores de Kr y $\Delta\beta$ para doblado en “V” para el material ASTM A-36

Acero ASTM A-36						
Sentido de Laminación		Espesores (mm)	Kr	$\Delta\beta(^{\circ})$	Kr Promedio	$\Delta\beta$ Promedio ($^{\circ}$)
0,8	18					
0,81	17,12					
0,81	17,12					
Perpend	5	0,81	17,12	0,8125	16,84	
		0,81	17,12			
		0,82	16			
		0,81	17,12			

Tabla 4.16 Valores de Kr y $\Delta\beta$ para doblado en “V” para el material Aluminio 3003 H-14

Aluminio 3003 H-14					
Sentido de laminación	Espesores (mm)	Kr	$\Delta\beta(^{\circ})$	Kr Promedio	$\Delta\beta$ Promedio ($^{\circ}$)
Paralelo	1,9	0,77	20,7	0,77	20,65
		0,78	19,74		
		0,77	20,7		
		0,76	21,47		

Perpendicular		0,8	18	0,8	18
		0,8	18		
		0,8	18		
		0,8	18		

Tabla 4.17 Valores de Kr y $\Delta\beta$ para doblado en “V” para el material Aluminio 3003 H-14

		Aluminio 3003 H-14				
		Espesores (mm)	Kr	$\Delta\beta(^{\circ})$	Kr Promedio	$\Delta\beta$ Promedio ($^{\circ}$)
Sentido de Laminación	Paralelo	3	0,8	18	0,805	17,55
			0,81	17,1		
			0,81	17,1		
			0,8	18		
	Perpend	3	0,81	17,1	0,815	16,13
			0,81	17,1		
			0,83	13,23		
			0,81	17,1		

4.11. Cálculo del Factor de recuperación elástica “Kr” teórico

En el capítulo II ya se mencionó el ángulo de recuperación elástica teórico “ $Kr_{teórico}$ ” en la ecuación (2.12), el cual al igual que el ángulo de recuperación elástica experimental permitió cuantificar la recuperación elástica en función del módulo de elasticidad, radio del punzón y el espesor de la lamina.

Es notable mencionar que se usaron dos punzones de radios distintos según el material y espesor; con el fin de simular con mayor exactitud las condiciones de doblado que se ejecutaron a las piezas antes trabajadas.

$$Kr = \frac{R_i}{R_f} = 4 \left(\frac{R_i S_y}{Et} \right)^3 - 3 \left(\frac{R_i S_y}{Et} \right) + 1$$

A continuación se muestra un ejemplo de cálculo para el material Aluminio 3003 H-14 para un espesor de 3 mm (Paralelo al sentido de laminación).

$$\frac{R_i}{t} = \frac{3}{3} = 1 \text{ (mm/mm)}$$

$$\frac{S_y}{E} = \frac{241,37}{8371,66} = 0,0243$$

$$Kr = 4(0,0243 * 1)^3 - 3(0,0243 * 1) + 1 = 0,923$$

Tabla 4.18 Valores teóricos de la recuperación elástica para los Acero ASTM A-569 (3mm) y ASTM A-36 (5mm)

Aceros ASTM A-569 (3mm) y ASTM A-36 (5mm)						
Sentido de laminación	Espesores (mm)	Ri (mm)	Kr	Espesores (mm)	Ri (mm)	Kr
Paralelo	3	3	0,94	5	3	0,95
Perpendicular		3	0,94		3	0,95

Tabla 4.19 Valores teóricos de la recuperación elástica para Aluminio 3003 H-14

Aluminio 3003 H-14						
Sentido de laminación	Espesores (mm)	Ri (mm)	Kr	Espesores (mm)	Ri (mm)	Kr
Paralelo	1,9	1	0,96	3	3	0,92
Perpendicular		1	0,94		3	0,92

4.12. Resultados del Radio final y ángulo final de la probeta después del doblado en "V"

Tabla 4.20 Valores de radio final y ángulo final promedio según material, espesor y sentido de laminación.

Material	Sentido de laminación	Espesor (mm)	Radio final (mm)	Angulo Final promedio θ (°)
ASTM A-569	Paralelo	3	3,28371107	104,5
	Perpendicular		3,23483376	102
ASTM A-36	Paralelo	5	3,19432258	107,5
	Perpendicular		3,18640495	108
Aluminio 3003 H-14	Paralelo	3	3,55884314	106,25
	Perpendicular		3,56911757	106,5
	Paralelo	1,9	1,09521546	111
	Perpendicular		1,05472725	108

Tabla 4.21 Ubicación de la línea neutral con relación al radio del punzón y espesor de la lámina

r/t	0,5	0,8	1,0	1,2	1,5	2	3	4	5
%Espesor (%)	30	34	37	40	41	42	44	46	50

4.13. Análisis de los Resultados

4.13.1. Ensayos de tracción

En las figuras (4.3), (4.4), (4.5) y (4.6) se exponen las gráficas de los ensayos de tracción realizados al material aluminio 3003 H-14 de espesores 1,9mm y 3mm tomando en cuenta el sentido de laminación, de las cuales se obtuvieron los valores del esfuerzo máximo de tracción (S_{max}) y esfuerzo de fluencia (S_y). En el sentido de laminación perpendicular se obtuvieron valores promedios mayores (S_{max} y S_y) para ambos espesores con respecto al sentido de laminación paralelo, los valores promedios obtenidos para el espesor 1,9mm en sentido perpendicular fueron los siguientes $S_{max} = 162,79$ (N/mm²), $S_y = 149,23$ (N/mm²) y para 3mm en sentido perpendicular fueron los siguientes $S_{max} = 158,16$ (N/mm²), $S_y = 150,24$ (N/mm²).

Para el caso del Acero ASTM A36 se muestran las graficas (4.9) y (4.10) encontrando mayores valores de esfuerzo máximo y esfuerzo de fluencia en el sentido perpendicular de laminación, dicho comportamiento se presento de manera similar en el Acero ASTM A-569 representado en las graficas (4.9) y (4.10).

De manera general puede observarse en los resultados obtenidos, que la evaluación según la orientación de laminación ofrece mayores valores de resistencia y mayores valores de ductilidad en el sentido perpendicular; y en caso contrario en el sentido de laminación paralelo presenta menores valores de resistencia y menor ductilidad para los distintos materiales. Este aumento en las propiedades en el sentido perpendicular con respecto al paralelo puede deberse a la disposición de los granos en la lámina, puesto que al efectuarse la deformación como es en el caso del sentido perpendicular la carga es aplicada de manera inversa a la disposición de los granos provocando una acumulación de éstos y a su vez aumentando la resistencia a la deformación de la probeta.

4.13.2. Factor de forma para doblado en “V”

En las tablas 4.13.A, 4.13.B, 4.13.C y 4.13.D se muestran los valores obtenidos del factor geométrico de la matriz para los materiales ASTM A36, ASTM A-569 y Aluminio 3003 H-14 para ambos sentidos de laminación, obteniendo como resultados mayores valores de factores en los sentidos perpendiculares de laminación para los materiales. Es importante resaltar que los rangos teóricos para el factor geométrico en el doblado en “V” deben oscilar entre 1,2 y 1,3 según lo recomendado (*ASM 1998*).

Las diferencias obtenidas de los valores experimentales pueden atribuirse a las distancias entre los apoyos o abertura de la matriz. La abertura de la matriz utilizada en el ensayo de doblado fue de 70,9 mm siendo no adecuada para estas condiciones, ya que la abertura adecuada de la matriz en V varía en función del espesor, para un valor de K de 1,2 la abertura de la matriz debe ser de 16 veces el espesor de la lamina y para un valor de K de 1,33 la abertura de la matriz es de 8 veces el espesor de la lamina. Una condición primordial para la buena ejecución del proceso de doblado es la correcta selección de la abertura de la matriz.

Para un factor geométrico de $K = 1.33$, la abertura de la matriz recomendada es de 8 veces el espesor ($8t$) para un rango de 3 a 8mm de espesor (*ASM. 1998*), mientras que $K = 1.2$ debe tener una abertura de matriz de 16 veces el espesor ($16t$) para espesores mayores a 12mm.

4.13.3. Recuperación elástica para el doblado en “V”

Como parámetro para cuantificar la recuperación se utilizó el factor de recuperación elástica K_r como coeficiente entre ángulos de doblado.

El valor K_r igual a la unidad indicará la ausencia de recuperación, mientras que un valor igual a cero indicara una recuperación elástica completa.

En las tablas 4.16 a la 4.20 se muestran los comportamientos de la recuperación elástica expresados como $Kr = \beta_f / \beta_i$ y $\Delta\beta = \beta_i - \beta_f$ en función del ángulo final β_f° para el doblado en “V”.

En los resultados obtenidos se puede notar que en el sentido paralelo de laminación existe una mayor contribución de la recuperación elástica esto puede atribuirse al hecho de que la recuperación está asociada a los esfuerzos de fluencia y modulo de elasticidad. Es por esto que se observa una diferencia aproximada de un 5 % en cuanto a los valores experimentales y de igual manera a los valores teóricos en función de los sentidos de laminación.

La recuperación elástica se ve influenciada por el material, espesor y sentido de laminación. Queda demostrado en los ensayos del aluminio 3003 H-14, que a mayor espesor de lámina mayor es la recuperación elástica. En función del sentido de laminación se tiene una mayor recuperación en el sentido paralelo que en el sentido perpendicular, de todos los materiales usados, esto puede atribuirse a las disposiciones de los granos después del proceso de deformación.

4.13.4. Ensayos de microdureza Vickers

La dureza de un material es una medida de la oposición de éste a ser penetrado por un objeto. En el ensayo de dureza se realizaron cinco mediciones a lo largo del perfil de doblado (véase figura 3.6) en las tablas (4.10.A – 4.10.H) se muestran los resultados de valores de dureza promedio para cada condición de material y sentido de laminación. Cabe destacar que a lo largo de las mediciones y por las disposiciones de las probetas en el ensayo, se obtienen valores decrecientes de dureza tomados desde la sección interna del doblado hasta la parte externa del doblado (de la zona a compresión a la zona de tracción), este comportamiento puede deberse a las disposiciones de los granos después del proceso de doblado; ya que al

producirse el conformado las fibras externas están en tensión, mientras que las internas en compresión a lo largo de la fibra neutral. En general la resistencia a la compresión de la lámina es mayor que su resistencia a la tracción.

4.13.5. Carga de doblado en “V”

En las tablas 4.9 y 4.10 se muestran los valores de las cargas experimentales para el doblado en “V” de las probetas ensayadas. Se puede verificar que para todas las condiciones se obtienen cargas mayores en sentido perpendicular de laminación, esto puede deberse a las propiedades mecánicas de cada condición puesto en los sentidos perpendiculares existe una mayor resistencia que en los sentidos paralelos, aumentando las cargas necesarias para el doblado en condiciones similares.

Las distancias entre los apoyos o abertura de la matriz, afecta la fuerza necesaria para doblar la pieza de trabajo. Si aumentamos la abertura de la matriz para un mismo material y un mismo espesor, la fuerza necesaria para doblar disminuirá. Por tanto decimos que la fuerza de doblado necesaria es inversamente proporcional al ancho de la matriz.

4.15.5. Radio final de curvatura de la pieza doblada

En la tabla 4.22 se muestran los valores de radio final y ángulo final de doblado de las probetas ensayadas. En el radio final se presentó una diferencia mínima en ambos sentidos de laminación para todos los materiales, presentando en el sentido paralelo el mayor radio final. Notando un aumento en el radio final con respecto al radio inicial, esto es debido a que debe existir un aumento producto de la recuperación elástica presenciada.

CAPÍTULO 5

Conclusiones

En los valores de fuerza de doblado se presentaron diferencias menores del 10% en todos los materiales según las condiciones de laminación, obteniendo en común mayores valores de fuerza en el sentido perpendicular de laminación. Esto puede ser atribuido a que existe mayor resistencia en el sentido perpendicular de laminación. En cuanto a los valores de carga máxima experimental de doblado en los aceros se obtuvo un valor mayor en ASTM A36 con relación al acero ASTM A-569, esto debido a la diferencia de porcentaje de carbono que existe entre estos dos aceros.

En el ensayo de microdureza Vickers se obtuvo una relación constante entre los valores obtenidos, donde se apreció una diferencia de alrededor del 9% mayor en el sentido paralelo de laminación en los materiales estudiados.

En el cálculo del factor de forma se obtuvieron diferencias del 10 % entre los valores de sentido de laminación para un mismo material y espesor. Obteniendo el mayor factor de forma en el sentido perpendicular, esto es debido a que el factor de forma depende de la fuerza de doblado, este comportamiento se presentó en ambos materiales.

Se comprobó que existe una diferencia aproximada de 3% del factor de la recuperación elástica experimental en función del sentido de laminación,

presentando una mayor recuperación en el sentido paralelo a la laminación ocurriendo en todas las condiciones estudiadas. Esto puede atribuirse a la disposición de los granos después del proceso de deformación. Se encontró una diferencia aproximada de un 7 % en cuanto a los valores experimentales y valores teóricos en función de los sentidos de laminación, demostrando que el modelo teórico utilizado presenta una muy buena aproximación a los datos experimentales.

Los valores de radio final de doblado no presentaron diferencia significativa con respecto a los sentidos de laminación, se comprobó que el radio final de doblado es mayor al radio inicial de doblado esto es debido a la recuperación elástica. La diferencia que existe entre el radio final de la pieza doblada y el radio inicial es de un 10 %.

Recomendaciones

Para finalizar este trabajo, se presentan un conjunto de propuestas para establecer enfoques o trabajos de grado futuros.

Proponer el estudio de la influencia del radio mínimo de doblado en función de distintos materiales y espesores en el proceso de doblado.

Estudiar la posibilidad de utilizar otros materiales y rangos de espesores para de esta manera profundizar el estudio de la recuperación elástica en el doblado.

Continuar con los estudios del proceso de doblado con distintas matrices a la ya utilizada, para de este modo observar el comportamiento del proceso y la tendencia en la recuperación elástica, ampliando con esto la información disponible referente al tema.

Otra sugerencia sería la fabricación de herramientas necesarios para el uso del dispositivo de doblado en "V" adecuado a distintos espesores de lámina y material.

Anexos

A continuación se presentan un conjunto de recomendaciones que deben ser tomadas en consideración en la selección de herramientas del proceso de doblado en función de los materiales acero ASTM A-569, ASTM A-36 y aluminio 3003 H-14 para doblado en “V”.

Entre las variables a considerar se mencionan:

Radio mínimo de doblez

Abertura de la matriz

Fuerza de doblado

Radio mínimo de doblez se conoce como la recta o grieta que aparece en la superficie exterior del doblado y se encuentra expresado en función del espesor *ASM. (1998)*.

Como valor aproximado para el radio mínimo de doblez, R_{min} puede tomarse el que resulta de la relación $R_{min} = k * t$, donde k es el coeficiente que depende del material.

TABLA A. Factor k recomendado para cálculo de radio mínimo según los materiales

Material	Factor k
Aluminio 3003 H-14	1
Acero al carbono ASTM A-36	1,3
Acero al carbono ASTM A-569	1,3

Dicho R_{min} es el valor mínimo recomendado de radio que deben poseer los punzones para evitar grietas que puedan afectar su resistencia.

La **Abertura de la matriz** adecuada para un doblado en "V" a 90^0 se define en función al espesor de la lámina, esta abertura varía entre 6 y 12 veces el espesor de la lámina (recomendada 8 veces el espesor). En la tabla B se presentan los valores recomendados de abertura de matriz según el espesor ASM. (1998).

Tabla B. Valores recomendados para la abertura de matriz según espesor

Espesor t (mm)	0,5 – 2,5	3,0 – 8,0	9 - 10	> 12
W	6 x t	8 x t	10 x t	12 x t

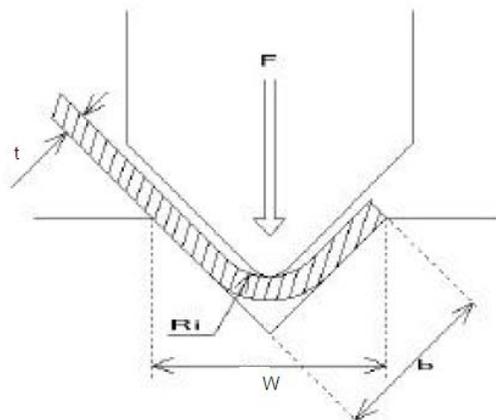


Figura A. Representación de las variables de doblado

Para la representación de todas las variables involucradas en el doblado se presenta una tabla que le permitirá al operador del proceso obtener de manera rápida y sencilla los datos asociados a la operación de doblado. En ella encontramos las siguientes variables.

Espesor (t) de la lámina expresada en mm.

Abertura de la matriz (W) expresada en mm. Se presentan las W estándar que se suelen comercializar.

Ala mínima de doblado (b) a la que se puede doblar. Medida exterior expresada en mm.

Radio interno final de doblado (Ri) de la lámina que se obtendrá. Como se ha mencionado anteriormente el radio de doblado es aproximadamente una sexta parte de la abertura de la matriz.

Fuerza de doblado (ton) por metro necesaria para doblar acero de 45 – 50 kg/mm² de resistencia a la tracción.

Tabla C. Tabla de doblado. Valores para la preselección de herramientas

t mm	W	6	8	10	12	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	320	
	b	4	5,5	7	8,5	11	14	18	22	28	35	45	55	71	89	113	140	175	226	
	Ri	1	1,3	1,6	2	2,6	3,3	4	5	6,5	8	10	13	16	20	26	33	41	53	
0,6		4	4																	
0,8		7	5	4																
1		11	8	7	6															
1,2		6	12	10	8	6														
1,5			17	15	13	9	8													
2				27	22	17	13	11												
2,5					35	26	21	17	13											
3						38	30	24	19	15										
4							54	42	34	27	21									
5								67	52	42	33	26								
6									75	60	48	38	30							
8										107	85	68	53	43						
10											134	105	85	67	53					
12													120	96	78	60				
15														150	120	95	75			
20															215	170	135	108	85	
25																265	210	170	130	

F
T/m

Relación entre la fuerza de doblado F y la resistencia de la lámina

Como hemos mencionado los valores de fuerza que aparecen en la tabla es para un material con una resistencia de $d_{\text{acero}} = 45- 50 \text{ kg/mm}^2$. Esta resistencia se corresponde con un acero dulce (0,2% de carbono). La fuerza necesaria para otro tipo de material se puede calcular fácilmente ya que esta es directamente proporcional a la resistencia de la lámina. Por lo tanto, para

calcular la fuerza necesaria para doblar acero inoxidable ($d_{inox} = 65 \text{ kg/mm}^2$) se tiene.

$$F_{inox} = F_{acero} * \frac{d_{inox}}{d_{acero}}$$

Este cálculo será válido para cualquier otro material.

Una vez calculado este dato es importante verificar si el punzón y la matriz que se va a utilizar soportan la carga aplicada (*Schiavi. 2000*).

Referencias

- ASTM. (1999). *ASTM E 8 M*: Standard test Methods for tension testing of Metallic Materials
- ASM. (1998). *ASM Handbook*. Volume 14, Forming and Forging
- Aparicio, G & D'Armas, H (2006). Influencia del tratamiento térmico y del trabajo en frío en el comportamiento mecánico de láminas de acero ASTM A-569. Trabajo de ascenso UC.
- Ballesteros, S., (2005). Tecnología de proceso y transformación de materiales (1st ed.) UPC.
- Beddoes, J., (1999). Principles of metal manufacturing processes. London. Arnold
- Castillo M. (2003). Determinación de la zona de material afectada mecánicamente, según la variación de los parámetros característicos, en el proceso de doblado. Trabajo de Grado UC.
- Da Silva Botelho, T. et al (2007). Experimental and finite element analysis of spring back in sheet metal forming. *International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering*
- Fuh-Kuo C. & Shen- Fu K (2006). Deformation analysis of springback in L- bending of sheet metal. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*.
- García, M., (2005). Contribución al estudio del proceso de doblado al aire de chapa modelo de predicción de ángulo de recuperación y del radio de doblado final. Tesis Doctoral Universidad de Girona.
- Gardiner, F. (1957). Estudio de la recuperación elástica de los metales. *Transactions of the ASME*, 79(1), 1-9.

- Luna, J., (2001). *Proyecto de mejoramiento de tecnología de estampado y troquelado. Calculo de dobléz L, U y V.* Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial.
- Kalpakjian, S., & Schmid R., (2003). *Manufactura, ingeniería y Tecnología (4th ed.)* Prentice Hall.
- Ledezma F. (2009). Tecnología de los materiales, Universidad Mayor de San Simón. Facultad de ciencias y tecnología. Cocha chamba, Bolivia. <http://materias.fcyt.umss.edu.bo/tecno-II/PDF/cap-332.pdf> extraído 17/12/09.
- Sáenz L & Este P. (2004). Evaluación de la Resistencia a fatiga y límite de fatiga de aceros de medio y bajo carbono. Trabajo de ascenso UC.
- Schiavi Macchine Industrial Spa (2000). Manual de Usuario.
- Marciniak, Z. (1992). The mechanics of sheet metal forming. London: Edward Arnold.
- Valbuena F, Urbano L (2008). Determinación experimental de la recuperación elástica en el doblado con dado basculante y doblado en "V", para láminas de acero al carbono AISI 1008. Trabajo de Grado UC.